

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Marija Stipić

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Darko Kozarac, dipl. ing.

Student:

Marija Stipić

Zagreb, 2018.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svom mentoru dr. sc. Darku Kozarcu na pomoći i korisnim savjetima prilikom izrade ovog završnog rada.

Marija Stipić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodogradnja i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Marija Stipić**

Mat. br.: 0035200512

Naslov rada na
hrvatskom jeziku:

**Validacija modela predviđanja detonantnog izgaranja uz povišene
udjele povratnih ispušnih plinova (EGR)**

Naslov rada na
engleskom jeziku:

**Validation of model for predicting knock in cases with increased levels
of exhaust gas recirculation (EGR)**

Opis zadatka:

Simulacije radnog ciklusa motora s unutarnjim izgaranjem sve su važniji alat u razvoju motora s unutarnjim izgaranjem. Ove simulacije omogućuju proračun termodinamičkih procesa u cijelom motoru te izračun značajki rada motora kao što su snaga, moment, potrošnja goriva itd. u ranoj fazi razvoja motora. Da bi ove simulacije bile primjenjive za izračun značajki rada Ottovog motora, moraju sadržavati proračun predviđanja detonantnog izgaranja koje ograničava dio mogućeg područja rada Ottovog motora. Na Katedri za motore i vozila razvijen je napredni alat za proračun detonantnog izgaranja koji uključuje proračun temperaturne nehomogenosti neizgorjele zone te proračun detaljne kemijske kinetike samozapaljenja primijenjenog goriva. Model je validiran u standardnom radu Ottovog motora, ali nije validiran pri radu motora s povišenim udjelima EGR-a. S obzirom da trend razvoja Ottovih motora uključuje primjenu povećanih udjela EGR-a, model detonantnog izgaranja je potrebno validirati i u tom načinu rada.

U radu je potrebno:

- napraviti pregled literature iz područja detonantnog izgaranja i modela za njegovo predviđanje,
- proučiti dostupne eksperimentalne rezultate koji će se koristiti za validaciju,
- izraditi simulacijski model eksperimentalnog motora na kojem će se provesti validacija,
- provesti simulacije u eksperimentalnim radnim točkama motora bez modela detonacije,
- uključiti model detonacije te podesiti parametre na radnim točkama bez EGR-a,
- primijeniti model detonacije s tako podešenim parametrima na radne točke s EGR-om,
- usporediti eksperimentalno dobivene indikatore detonantnog izgaranja sa simulacijom,
- izvesti zaključke.

Pri izradi se treba pridržavati pravila za izradu završnog rada. U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

30. studenog 2017.

Rok predaje rada:

- 1. rok: 23. veljače 2018.
- 2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2018.
- 3. rok: 21. rujna 2018.

Predviđeni datumi obrane:

- 1. rok: 26.2. - 2.3. 2018.
- 2. rok (izvanredni): 2.7. 2018.
- 3. rok: 24.9. - 28.9. 2018.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Darko Kozarac

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Igor Balen

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA.....	III
POPIS TABLICA	IV
POPIS OZNAKA.....	V
POPIS KRATICA	VII
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY.....	IX
1. UVOD	1
2. DETONANTNO IZGARANJE.....	4
2.1. Teorija samozapaljenja	6
2.2. Parametri koji utječu na detonantno izgaranje	8
2.3. Modeliranje detonantnog izgaranja	10
2.4. 1-D/0-D modeli Ottovog motora	11
3. NOVI MODEL DETONANTNOG IZGARANJA.....	13
3.1. Podmodel temperaturne raspodjele	13
3.2. Podmodel za detekciju pojave samozapaljenja	14
3.3. Podmodel za procjenu intenziteta detonacije	16
3.3.1. Proračun tlaka i temperature uslijed detonantnog izgaranja	16
3.3.2. Proračun intenziteta detonantnog izgaranja	17
4. VALIDACIJA NOVOG MODELA DETONANTNOG IZGARANJA	18
4.1. Eksperimentalni motor	18
4.2. Radne točke	19
4.3. Opći opis simulacijskog modela	23
4.4. Ocjena primjenjivosti simulacijskog modela	23

4.5. Kalibracija modela detonantnog izgaranja	29
4.6. Rezultati validacije modela	30
5. ZAKLJUČAK.....	39
LITERATURA	41

POPIS SLIKA

Slika 1. Shema EGR sustava [1]	2
Slika 2. Usporedba profila tlaka [4]	5
Slika 3. Nastanak detonantnog izgaranja prema teoriji samozapaljenja [4].....	6
Slika 4. Promjena tlaka u cilindru s promjenom točke paljenja [1]	9
Slika 5. Varijacije tlaka u uzastopnim ciklusima u cilindru Ottovog motora [4].....	10
Slika 6. Jednozonski model (lijevo) i dvozonski model (desno) [4]	12
Slika 7. Podjela zone u podzone [4]	14
Slika 8. Hatz 1D81[5].....	19
Slika 9. Motor s EGR sustavom u Laboratoriju za motore i vozila	19
Slika 10. Određivanje indikatora detonacije [3].....	21
Slika 11. Model motora u Boost-u	23
Slika 12. Usporedba zadane temperature na rubnom uvjetu SB1 i temperature na usisu izmjerene na eksperimentalnom motoru	24
Slika 13. Usporedba simulacijom dobivene temperature ispušnih plinova s izmjerenom temperaturom ispušnih plinova za svaku radnu točku	25
Slika 14. Usporedba simulacijom dobivenog protoka goriva s izmjerenim protokom goriva za svaku radnu točku.....	25
Slika 15. Usporedba simulacijom dobivenog protoka zraka s izmjerenim protok zraka za svaku radnu točku.....	26
Slika 16. Usporedba simulacijom dobivenog faktora zraka s izmjerenim faktorom zraka za svaku radnu točku.....	26
Slika 17. Usporedba profila tlaka u cilindru dobivenog simulacijom i izmjerenog.....	28
Slika 18. Usporedba MAPO i OB s IoK i α_{det} za $\sigma_{T,max}=40$ i KI=0,8	30
Slika 19. Usporedba MAPO i OB s IoK i α_{det} za $\sigma_{T,max}=45$ i KI=0,85	31
Slika 20. Usporedba MAPO i OB s IoK i α_{det} za $\sigma_{T,max}=55$ i KI=0,9	32
Slika 21. Usporedba MAPO i OB s IoK i α_{det} za $\sigma_{T,max}=60$ i KI=0,95	33
Slika 22. Usporedba MAPO i OB s IoK i α_{det} za $\sigma_{T,max}=35$ i KI=0,75	34
Slika 23. Usporedba MAPO i OB s IoK i α_{det} za $\sigma_{T,max}=30$ i KI=0,7	35
Slika 24. Usporedba MAPO i IoK za sve kombinacije $\sigma_{T,max}$ i KI.....	36

POPIS TABLICA

Tablica 1 Karakteristike eksperimentalnog motora.....	18
Tablica 2 Svojstva goriva INA BS 95 Class	20
Tablica 3 Radne točke	20
Tablica 4 Vrijednosti MAPO za sve radne točke	22
Tablica 5 Kombinacije σ_T , max i KI.....	29

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A	msbar ²	Faktor frekvencije
B	K	Faktor aktivacijske energije
IoK	-	Intenzitet detonantnog izgaranja
KI	-	Integral detonantnog izgaranja
MAPO	Pa	Najveća amplituda visokofrekventnih oscilacija tlaka
m_{NS}	kg	Masa neizgorjele smjese
n	1/min	Brzina vrtnje
n_p	-	EkspONENT tlaka
n_{NS}	-	Broj podzona podmodela temperaturne raspodjele
p	Pa	tlak
p_{cil}	Pa	Tlak u cilindru
p_{filt}	Pa	Filtrirani tlak
p_{usis}	Pa	Tlak u usisnoj cijevi
Q_{det}	J	Energija oslobođena detonantnim izgaranjem
Q_{uk}	J	Ukupna energija oslobođena samozapaljenjem smjese goriva i zraka
r_{NT}	-	Udio toplinske energije oslobođene niskotemperaturnim izgaranjem
T	K	Temperatura
T_{ispuh}	K	Temperatura u ispušnoj cijevi
T_{max}	K	Najveća temperatura neizgorjele smjese u temperaturnom intervalu negativnog temperaturnog koeficijenta
T_{min}	K	Najmanja temperatura neizgorjele smjese u temperaturnom intervalu negativnog temperaturnog koeficijenta
T_{NS}	K	Temperatura neizgorjele smjese
t_{PI}	s	Vrijeme početka izgaranja
T_{usis}	K	Temperatura u usisnoj cijevi
x_{izg}	-	Udio izgorjelog goriva
x_{PI}	-	Maseni udio produkata izgaranja
α_{det}	°KV	Kut zakreta koljenastog vratila u trenutku pojave detonantnog izgaranja
α_p	°KV	Točka paljenja
ε	-	Kompresijski omjer
λ	-	Faktor zraka
σ_T	K	Standardna devijacija temperature neizgorjele smjese

$\sigma_{T,max}$	K	Najveća standardna devijacija temperature neizgorjele smjese
τ_{in}	s	Vrijeme iniciranja samozapaljenja
$\tau_{in,NT}$	s	Vrijeme iniciranja niskotemperaturnog samozapaljenja
$\tau_{in,VT}$	s	Vrijeme iniciranja visokotemperaturnog samozapaljenja

POPIS KRATICA

Oznaka	Opis
0-D	Bezdimenzijski
1-D	Jednodimenzijski
3-D	Trodimenzijski
CFD	Računalna dinamika fluida
DKI	Bezdimenzijski indeks detonantnog izgaranja
EGR	Recirkulacija ispušnih plinova
GMT	Gornja mrtva točka
IMPO	Integral modula visokofrekventnih oscilacija tlaka u cilindru
KV	Koljenasto vratilo
MAPO	Najveća amplituda visokofrekventnih oscilacija tlaka u cilindru
OB	Oktanski broj

SAŽETAK

Detonantno izgaranje predstavlja jedan od temeljnih problema Ottovog motora jer njegova pojava postavlja granicu povećanju termičkog stupnja djelovanja. Detonantno izgaranje je nekontrolirano izgaranje koje može uzrokovati značajna mehanička oštećenja vitalnih dijelova motora, a ovisi o mnogobrojnim parametrima poput opterećenja motora, brzine vrtnje, sastava smjese goriva i zraka, temperature i tlaka svježe smjese na usisu i dr. Zbog svog značaja za rad Ottovog motora, opisivanje i predviđanje pojave detonacije predstavlja veliki izazov za razvojne inženjere. Budući da eksperimentalna istraživanja zahtijevaju primjenu izrazito skupe opreme i velik utrošak vremena unazad nekoliko godina razvijani su računalni alati za analizu procesa izgaranja koji znatno ubrzavaju proces razvoja motora.

Na Katedri za motore i vozila razvijen je novi model detonantnog izgaranja koji uključuje proračun temperaturne nehomogenosti neizgorjele zone te proračun detaljne kemijske kinetike samozapaljenja primijenjenog goriva. Model je validiran pri standardnom radu Ottova motora, međutim, nije validiran i pri radu motora s povišenim udjelima ispušnih plinova koji su iz ispušne grane vraćeni ponovno u usis putem sustava za povrat ispušnih plinova (EGR). Kako je EGR sustav postao neizostavna komponenta vozila zajedno s drugim tehnologijama za pročišćavanje ispušnih plinova, potrebno je validirati model i u tom režimu rada motora. U tu svrhu na eksperimentalnom motoru u Laboratoriju za motore i vozila izmjereno je 11 radnih točaka koje se prvenstveno razlikuju po masenom udjelu EGR-a i intenzitetu detonacije. U eksperimentalnoj analizi kao mjera intenziteta detonantnog izgaranja koristio se indikator MAPO. Validacija modela provedena je uspoređivanjem vrijednosti indikatora MAPO iz eksperimenta i vrijednosti intenziteta detonantnog izgaranja dobivenog simulacijom. Analizom rezultata utvrđeno je da novi model dobro predviđa pojavu detonantnog izgaranja pri radu motora s povišenim udjelima EGR-a.

Ključne riječi: detonacija, simulacije, EGR

SUMMARY

Engine knock is one of SI engines fundamental problems since its appearance limits the increase of engine efficiency. Engine knock is an uncontrolled combustion that can cause a significant mechanical damage to vital engine parts and it depends on numerous parameters, such as engine load, engine speed, air-fuel ratio, temperature and pressure of the mixture, etc. Due to its importance for the operation of Otto's engine, the description and the prediction of the knock is a major challenge for development engineers. Since experimental research requires the use of an extremely expensive equipment and is very time-consuming, over the past few years engineering tools for the process analysis have been developed that significantly accelerate the engine development process.

A new model of predicting engine knock has been developed at the Chair of IS Engines and Motor Vehicles, which includes the calculation of the temperature inhomogeneity of the unburned zone and the calculation of the detailed chemical kinetics of the auto-ignition of the used fuel. The model was validated at the standard operation of Otto engine, however was not validated in engine operation with the engine with higher EGR ratio. Since the EGR system has become an indispensable vehicle component along with other exhaust gas aftertreatment technologies, it is necessary to validate the model for prediction of knock in that operating mode. For this purpose, on the experimental engine at the Laboratory of Engines and Vehicles, 11 operating points were measured, which primarily differed in mass fraction of EGR and the intensity of the knock. In the experimental analysis, the MAPO indicator was used as a measure of intensity of the knock combustion. Validation of the model was performed by comparing the MAPO indicator value from the experiment and the intensity of knock combustion obtained by the simulation. Analysis of the results showed that the new model predicts the occurrence of knock combustion very well in the operation of engines with higher EGR ratio.

Key words: engine knock, simulation, EGR

1. UVOD

Motori s unutarnjim izgaranjem su jedan od ključnih pokretača modernog industrijskog društva. Ovaj pogonski stroj omogućio je mnoge udobnosti modernog života kakvog danas poznajemo te je današnji život bez njih nezamisliv. U zatvorenom prostoru cilindra motora izgara smjesa goriva i zraka te se pritom kemijska energija sadržana u gorivu pretvara u toplinu koja zagrijava plinove, oni ekspandiraju i prenose mehanički rad na klip i dalje na koljenasto vratilo. Zbog ograničenih zaliha fosilnih goriva i stalnog rasta cijena energenata, glavni cilj razvoja motora s unutarnjim izgaranjem postao je smanjenje potrošnje goriva, odnosno povećanje stupnja djelovanja motora. Nadalje, tijekom zadnjih 30-ak godina nova osobna i gospodarska vozila moraju zadovoljiti sve strože zakonske regulative o dopuštenim emisijama štetnih tvari. Smanjivanje emisija štetnih tvari postiže se kontinuiranim poboljšanjima procesa izgaranja u cilindru motora, poboljšanjem kvalitete goriva, pročišćavanjem ispušnih plinova nakon što izađu iz motora, optimiranjem upravljanja radom motora i vozila u cjelini te smanjivanjem otpora vožnje. Težnje ka sve nižoj potrošnji i smanjenju emisija štetnih tvari povećavaju kompleksnost motora i stavljaju razvojne inženjere pred sve veće i veće izazove. Razvojem računalnih alata i povećanjem njihove moći proces razvoja motora se ubrzao te su se smanjili njegovi troškovi. Za analizu procesa izgaranja kod motora s unutarnjim izgaranjem koriste se 1-D/0-D (engl. *One / Zero Dimension*) modeli, 3-D CFD (engl. *Computational Fluid Dynamics*) modeli i „real time“ modeli. 3-D simulacijski alati koriste se za detaljnu prostornu analizu strujanja smjese u cilindru i njenog izgaranja, te pri oblikovanju prostora izgaranja. Kod 1-D/0-D simulacijskih modela proračun protoka kroz usisne i ispušne cijevi baziran je na metodi konačnih volumena za jednodimenzijски problem, a cilindar se tretira kao kontrolni volumen bez orijentacije (nema prostorne diskretizacije cilindra). 1-D/0-D simulacijski alati nazivaju se često i simulacije radnog ciklusa, a služe za analizu utjecaja radnih parametara na performanse motora.

Kako bi se Ottovom motoru povećao termički stupanj djelovanja potrebno je povećati kompresijski omjer, tj. omjer najvećeg i najmanjeg volumena iznad klipa. Povećanjem kompresijskog omjera rastu vršni tlakovi i vršne temperature tijekom radnog ciklusa u cilindru uslijed čega može doći do pojave samozapaljenja neizgorjele smjese, a ono može preći u detonantno izgaranje. Detonantno izgaranje je nekontrolirano izgaranje koje može uzrokovati značajna mehanička oštećenja vitalnih dijelova motora, stoga tu pojavu treba pod svaku cijenu izbjeći. Detonantno izgaranje postavlja granicu povećanju kompresijskog omjera Ottovog

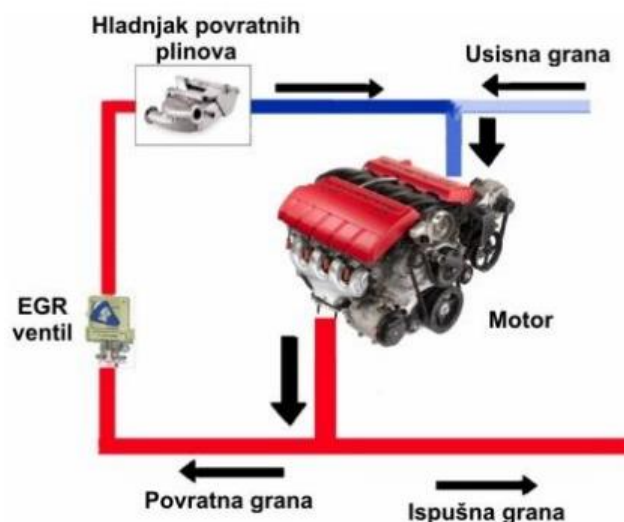
motora, a time i povećanju termičkog stupnja djelovanja. Zbog svog značaja za rad Ottovog motora, opisivanje i predviđanje pojave detonacije predstavlja veliki izazov za inženjere.

Na Katedri za motore i vozila razvijen je napredni alat za proračun predviđanja detonantnog izgaranja. Model je validiran u standardnom radu Ottovog motora, ali ne i pri radu motora s povišenim udjelima ispušnih plinova koji su vraćeni iz ispušne grane ponovno u usis putem sustav za povrat ispušnih plinova (EGR).

Cilj ovog završnog rada je pokazati kako novi model detonacije predviđa pojavu i intenzitet detonantnog izgaranja pri radu motora s povišenim udjelima EGR-a.

1.1. Povrat ispušnih plinova (EGR)

Sustav povrata ispušnih plinova ili *EGR* (engl. *Exhaust Gas Recirculation*) sustav pokazao se kao učinkovita metoda za smanjenje emisije dušikovih oksida (NO_x) u ispušnim plinovima kod Ottovih i Dieslovih motora. Iako je dušik kod standardnih uvjeta inertan plin, kod vrlo visokih temperatura i tlakova, kakvi vladaju u cilindru motora za vrijeme izgaranja, postaje reaktivan te se spaja s kisikom. Kod EGR sustava dio ispušnih plinova iz ispušne grane preusmjerava se putem reguliranog EGR ventila kroz EGR hladnjak i onda ponovno u usis. Shematski prikaz EGR sustava prikazan je Slikom 1.



Slika 1. Shema EGR sustava [1]

Ispušni plinovi koji se dovode ponovno u cilindar ne sudjeluju u izgaranju, ali troše toplinu da bi se zagrijali. Time se smanjuju visoke temperature i tlakovi za vrijeme izgaranja u cilindru, a posljedično i emisija dušikovih oksida.

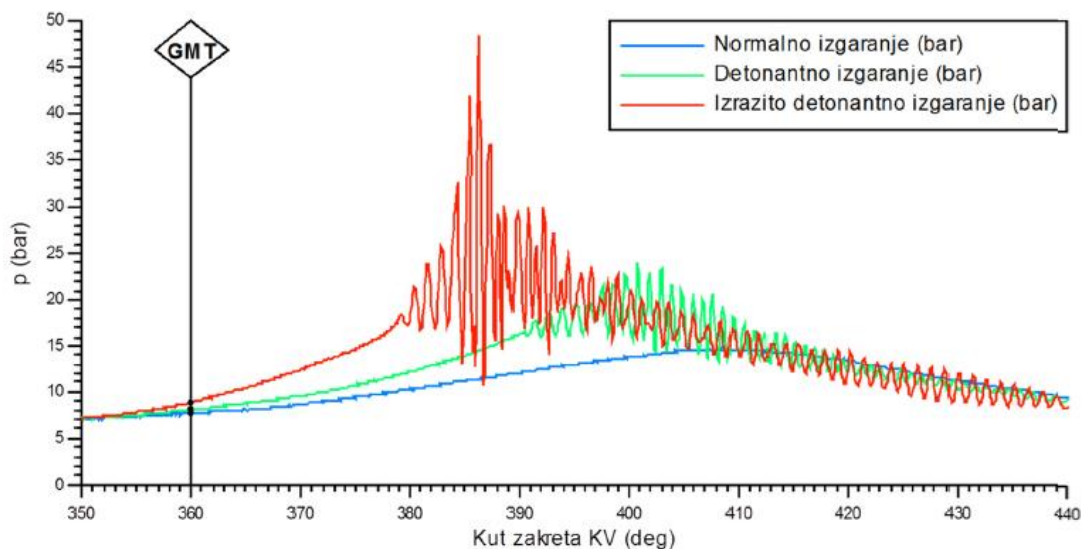
Miješanjem svježe smjese goriva i zraka s ohlađenim produktima izgaranja smanjuje se sklonost motora detonantnom izgaranju [2]. Stoga sustav povrata ispušnih plinova predstavlja ujedno i jednu od mjera suzbijanja pojave detonantnog izgaranja kod prednabijanih motora.

2. DETONANTNO IZGARANJE

Nepravilno izgaranje u Ottovim motorima može se javiti u različitim oblicima, a jedan od najpoznatijih i najčešćih oblika nepravilnog izgaranja je detonantno izgaranje ili detonacija (engl. *knocking*). Fenomen detonantnog izgaranja star je vjerojatno koliko i sam motor s unutarnjim izgaranjem. Javlja se i kod motora s vanjskom pripremom smjese i kod motora s unutarnjom pripremom smjese, neovisno o tome radili se o prednabijanim motorima ili ne. Detonantno izgaranje je jedan od temeljnih problema Ottovih motora. Ova pojava prepreka je daljnjem povećanju termičkog stupnja djelovanja.

Smjesa goriva i zraka u Ottovom motoru upali se električnom iskrom na svjećici. U trenutku preskakanja iskre dolazi do ionizacije dijela smjese koji se nalazi između elektroda, što rezultira formiranjem plazme i električnog izboja u obliku luka. Od mjesta upaljenja smjese fronta plamena prostorno se širi prema perifernim stijenkama prostora izgaranja. Tako se tijekom izgaranja u cilindru nalaze u isto vrijeme dva bitno različita medija, produkti izgaranja i neizgorjela smjesa, a dijeli ih napredujuća fronta plamena. Uslijed kompresije, odnosno gibanja klipa i ekspanzije produkata izgaranja neizgorjeloj smjesi rastu temperatura i tlak te se intenziviraju reakcije nastajanja slobodnih radikala i međuspojeva oksidacije goriva, a sama smjesa postaje eksplozivna. Kod normalnog izgaranja fronta plamena će zahvatiti smjesu prije nego što dođe do pojave njenog samozapaljenja. Međutim, pri većim opterećenjima povećani tlak i temperatura mogu ubrzati reakcije do te mjere da fronta plamena ne stigne zahvatiti ostatak smjese nego preostala smjesa izgori gotovo trenutno, pri čemu se naglo oslobodi kemijska energija preostalog dijela goriva. Lokalno dolazi do značajnog porasta tlaka i temperatura te formiranja tlačnih valova. Budući da je cilindar relativno malog promjera, a brzine rasprostiranja valova velike, valovi brzo stižu do stijenki prostora izgaranja i odbijaju se od njih. To ima za posljedicu visokofrekventne oscilacije tlaka u cilindru pri čemu je uobičajena frekvencija oscilacija tlaka kod motora za osobna vozila $f = 6$ do 25 kHz [3]. Te oscilacije tlaka u cilindru pobuđuju visokofrekventne vibracije kućišta motora i dijelova klipnog mehanizma, prepoznatljive po oštrom metalnom zvuku. Opisana pojava naziva se detonantnim izgaranjem.

Razlikujemo normalno detonantno izgaranje i ekstremno detonantno izgaranje. Razlika između normalnog i ekstremnog detonantnog izgaranja je u iznosu amplitude oscilacije tlaka u cilindru. Normalnim detonantnim izgaranjem smatraju se ona detonantna izgaranja s najvećim amplitudama tlaka u rasponu od 4 do 20 bar, a ekstremnim detonantnim izgaranjem sva ona detonantna izgaranja s amplitudama većim od 20 bar [3]. Slika 2 prikazuje usporedbu profila tlaka kod normalnog izgaranja i kod pojave detonantnog izgaranja.



Slika 2. Usporedba profila tlaka [4]

Na temelju istraživanja vršenih s optičkom opremom velike frekvencije uzrokovanja utvrđeno je da je detonantno izgaranje gotovo uvijek rezultat pojave samozapaljenja u neizgorjeloj smjesi ispred normalne fronte plamena, a intenzitet tlačnih oscilacija uzrokovan detonantnim izgaranjem ovisan o energiji oslobođenoj detonantnim izgaranjem i temperaturnom gradijentu u okolini vrućeg mjesta u kojem je došlo do samozapaljenja [3].

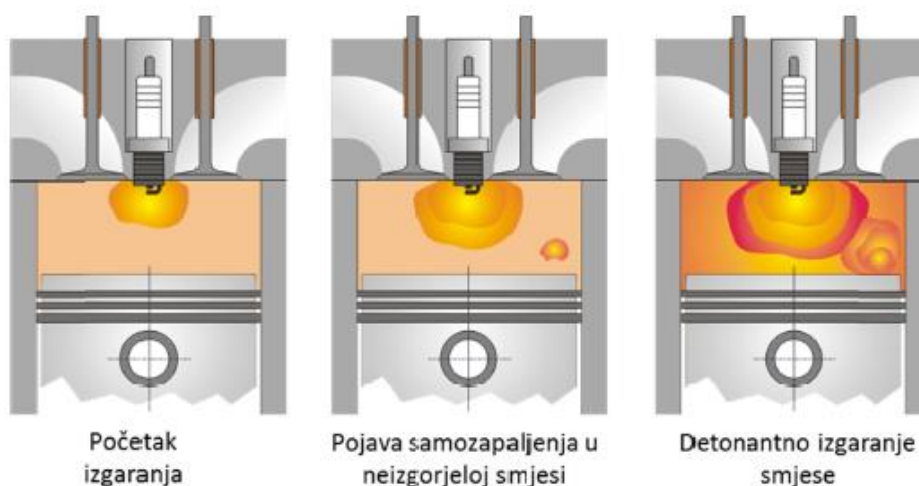
Indikatori intenziteta detonantnog izgaranja koji se najčešće primjenjuju u eksperimentalnim analizama su najveća amplituda oscilacije tlaka u cilindru *MAPO* (engl. *Maximum Amplitude Pressure Oscillation*), integral uspravljenog profila oscilacija tlaka *IMPO* (engl. *Integral of Modulus of Pressure Oscillation*) i bezdimenzijski indikator detonantnog izgaranja *DKI* (engl. *Dimensionless Knock Indicator*). Pri čemu je *DKI* definiran kao omjer *IMPO* vrijednosti i umnoška *MAPO* vrijednosti i intervala kuta zakreta koljenastog vratila unutar kojeg je pojava detonantnog izgaranja izgledna. Indikatori detonantnog izgaranja nemaju neku univerzalnu graničnu vrijednost nego ona ovisi o dimenzijama i obliku prostora izgaranja te uvjetima rada motora. Njihovo određivanje zahtjeva opsežnu analizu izmjerenih podataka.

Da bi se moglo pristupiti modeliranju pojave detonantnog izgaranja treba dobro razumjeti način njegova nastanka i poznavati parametre koji utječu na intenzitet detonacije.

2.1. Teorija samozapaljenja

Postoji više teorija nastanka detonantnog izgaranja, a dvije su najznačajnije: teorija samozapaljenja i teorija detonacije. U ovom radu opisana je samo teorija samozapaljenja budući da model detonantnog izgaranja koji će se opisati u nastavku ovog rada pretpostavlja da do pojave detonantnog izgaranja dolazi uslijed pojave samozapaljenja smjese goriva i zraka.

Prema teoriji samozapaljenja uzrok detonantnog izgaranja je pojava samozapaljenja dijela neizgorjele smjese koji još nije obuhvaćen plamenom. Samozapaljenje je proces izgaranja koji se odvija vrlo velikom brzinom, a nije uzrokovano egzotermnim izvorom paljenja [5].



Slika 3. Nastanak detonantnog izgaranja prema teoriji samozapaljenja [4]

Procesi koji se tijekom samozapaljenja odvijaju u neizgorjeloj smjesi ovise o parametrima kao što su vrsta goriva, tlak, lokalna temperatura i sastav smjese. Samozapaljenje se može javiti istovremeno ili jedno za drugim na različitim mjestima u neizgorjeloj smjesi. Kao posljedica pojave samozapaljenja lokalno naglo raste tlak i temperatura te se formiraju udarni tlačni valovi. Paljenje neizgorjele smjese uslijed samozapaljenja najčešće se javlja u rubnim područjima prostora izgaranja ili tik ispred fronte plamena. Područja neizgorjele smjese u kojima dolazi do samozapaljenja su mjesta koja imaju veću koncentraciju slobodnih radikala od ostatka neizgorjele smjese i nazivaju se vrućim mjestima (engl. *hot spots*).

Pojavu samozapaljenja uzrokuju lančane kemijske reakcije u kojima iz stabilnih spojeva ugljika i vodika koji čine gorivo nastaju reaktivni spojevi, takozvani radikali. Kod lančanih reakcija koje se odvijaju u smjesi ugljikovodika i zraka povećanje temperature primjećuje se tek nakon određenog vremenskog intervala koji ovisi o temperaturi, tlaku i sastavu smjese. Taj vremenski interval predstavlja vrijeme iniciranja pojave samozapaljenja (τ_{in}). Tijekom vremena iniciranja

pojave samozapaljenja koncentracija radikala eksponencijalno raste, a porast temperature je neznatan zbog male količine goriva koja je obuhvaćena reakcijama te malog iznosa energije koja se u toj fazi oslobađa. Brzina odvijanja kemijskih reakcija u kojima nastaju slobodni radikali značajno ovisi o temperaturi, pri čemu je ta ovisnost izrazito nelinearna. Eksperimentalnim analizama utvrđeno je da se promjena vremena inicijacije samozapaljenja s tlakom i temperaturom može opisati Arrheniusovim izrazom:

$$\tau_{in} = A \cdot p^{-n} \cdot e^{\frac{B}{T}} \quad (1)$$

pri čemu su:

τ_{in} – vrijeme inicijacije samozapaljenja, [ms],

A – faktor frekvencije, [mbarⁿ],

p – tlak smjese, [bar],

n – eksponent tlak,

T – temperatura smjese, [K],

B – faktor aktivacijske energije, [K].

Konstante A, n i B određuju se na temelju eksperimentalne analize ponašanja smjese goriva i zraka te ovise o primjenjivanom gorivu i sastavu smjese. Iz jednadžbe (1) je vidljivo da najveći utjecaj na vrijeme inicijacije samozapaljenja ima tlak smjese.

Goriva tipična za motore s unutarnjim izgaranjem imaju karakteristiku dvofaznog izgaranja. U temperaturnom području od 800K do 900K prije potpunog izgaranja smjese javlja se niskotemperaturno izgaranje ili hladni plamen (engl. *Cool flame*). Tijekom niskotemperaturnog izgaranja oslobađa se mali dio energije goriva (do 5% ukupne energije oslobođene samozapaljenjem) te dolazi do blagog porasta temperature u reakcijskoj zoni, uslijed čega se intenziviraju reakcije u kojima već formirani radikali tvore manje reaktivne spojeve što usporava porast temperature smjese i produlje vrijeme iniciranja samozapaljenja. Posljedica niskotemperaturnog izgaranja goriva je promjena vremena iniciranja samozapaljenja s negativnim temperaturnim koeficijentom. Područje negativnog temperaturnog koeficijenta karakteristično je po tome što se s porastom temperature produljuje vrijeme iniciranja samozapaljenja. Ovaj efekt može biti presudan za mjesto pojave samozapaljenja u neizgorjeloj smjesi. Kada se temperatura neizgorjele smjese nalazi unutar temperaturnog intervala između T_{min} i T_{max} smjesa će biti sklonija pojavi samozapaljenja u području gdje je temperatura smjese bliža temperaturi T_{min} . Znači da će kod uvjet rada gdje je temperatura neizgorjele smjese u

području negativnog temperaturnog koeficijenta do pojave samozapaljenja doći u hladnijem dijelu smjese. Nakon faze niskotemperaturnog izgaranja slijedi faza visokotemperaturnog izgaranja u kojoj dolazi do naglog oslobađanja preostale energije iz goriva i naglog porasta temperature smjese.

Osim o temperaturi vrijeme iniciranja samozapaljenja ovisi i o tlaku, vrsti goriva, faktoru zraka i udjelu produkata izgaranja. Uočeno je da se vrijeme iniciranja znatno smanjuje s povećanjem tlaka i s obogaćivanjem smjese ($\lambda < 1$), a s povećanjem sadržaja produkata izgaranja u svježoj smjesi dolazi do produljivanja faze iniciranja samozapaljenja.

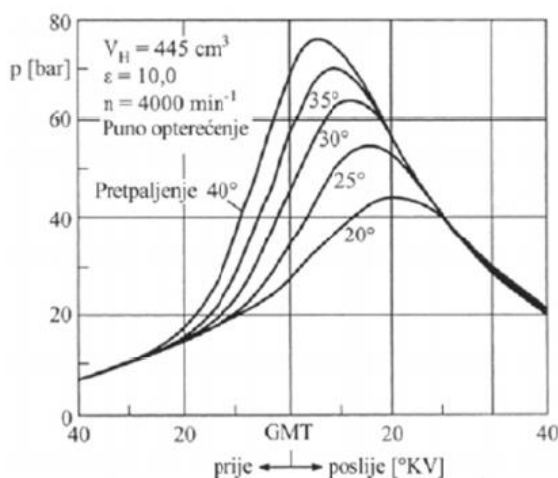
Samozapaljenje u neizgorjeloj smjesi ne mora nužno uvijek rezultirati detonantnim izgaranjem. Formiranje uvjeta za pojavu detonacije ovisi o reaktivnosti smjese oko mjesta samozapaljenja, a ona je u čvrstoj vezi s temperaturom i sastavom smjese.

2.2. Parametri koji utječu na detonantno izgaranje

Glavni čimbenici koji utječu na pojavu detonantnog izgaranja generalno su slični čimbenicima koji utječu na pojavu samozapaljenja neizgorjele smjese, a to su: tlak, temperatura, brzina vrtnje motora, maseni udio produkata izgaranja, faktor zraka, vrsta goriva, dimenzije i oblik prostora izgaranja. U ovom poglavlju ukratko su opisani parametri rada motora koji utječu na pojavu detonantnog izgaranja.

Kada se povećava opterećenje motora raste stupanj punjenja, odnosno povećava se masa svježe smjese u cilindru te shodno tome raste tlak na početku i na kraju kompresije. Kao posljedica toga povećava se sklonost motora pojavi detonantnog izgaranja. Promjenom opterećenja motora mijenja se masa svježe tvari u cilindru, a time i tlak na početku kompresije. Detonantno izgaranje javlja se prvenstveno u području većeg opterećenja. Detonacija se kod Ottovog motora može pojaviti kod niske brzine vrtnje i visokog opterećenja, ali isto tako do detonacije može doći i pri visokoj brzini vrtnje, ako motor dulje vremena radi pod velikim opterećenjem. Povećanjem kompresijskog omjera rastu tlakovi i temperature tijekom takta kompresije te se zbog toga u cilindru mogu stvoriti uvjeti za pojavu detonantnog izgaranja i prije trenutka preskakanja iskre. Danas uobičajeni kompresijski omjeri kreću se u rasponu od $\varepsilon = 9$ do $\varepsilon = 14$ [4]. Pored konstrukcijom zadanog kompresijskog omjera, najveći utjecaj na pojavu detonantnog izgaranja ima točka paljenja smjese. Što je točka paljenja ranija u odnosu na GMT veći je prirast tlaka i viši su vršni tlakovi u cilindru te je vjerojatnost pojave detonacije veća. Pomicanjem točke paljenja prema kasnije mogu se izbjeći kritične vrijednosti tlaka i

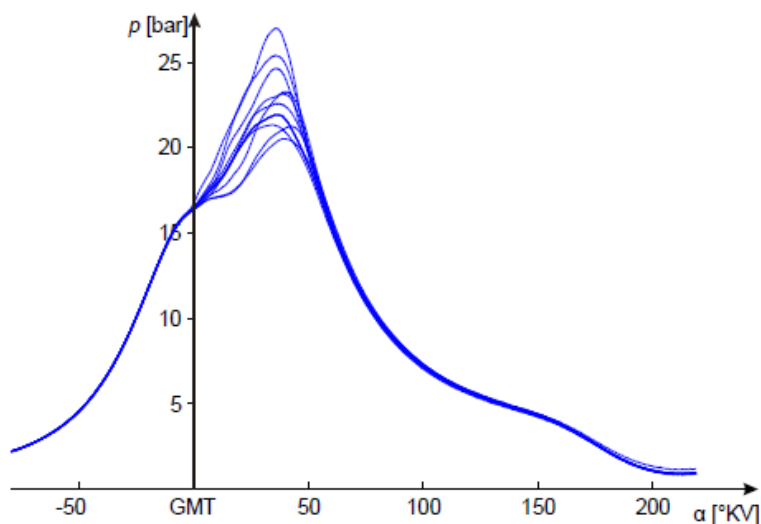
temperature, odnosno smanjiti sklonost motora pojavi detonantnog izgaranja. Slika 4 prikazuje utjecaj promjene točke paljenja na oblik profila tlaka u cilindru.



Slika 4. Promjena tlaka u cilindru s promjenom točke paljenja [1]

Nadalje, veća temperatura svježije smjese i povećani tlak punjenja uzrokuju povećanje tlaka i temperature u neizgorjeloj smjesi što ima za posljedicu povećanje sklonosti motora detonantnom izgaranju. Na sklonost motora pojavi detonantnog izgaranja utječe i način formiranja smjese. Unutarnju pripremu smjese, odnosno izravno ubrizgavanje goriva u cilindar karakterizira manja sklonost detonantnom izgaranju u odnosu na vanjsku pripremu smjese. Razlog je taj što kod izravnog ubrizgavanja gorivo svojim isparavanjem u cilindru oduzima toplinu usisanom zraku te se na taj način smanjuje temperatura svježije smjese u prostoru izgaranja.

Jedna od karakteristika izgaranja u Ottovom motoru su izražene cikličke varijacije u izgaranju. Iz ciklusa u ciklus mijenja se trenutak početka izgaranja zbog stalne promjene oblika strujanja i bogatstva smjese u okolini elektroda svjećice. Kao posljedica toga dolazi do cikličkih promjena tlaka i temperatura u cilindru, a to značajno utječe na pojavu detonantnog izgaranja. Stoga pojavu detonantnog izgaranja nije moguće analizirati na temelju jednog ciklusa, već je za to potreban odgovarajući statistički uzorak od barem 250 uzastopnih radnih ciklusa [4]. Veće cikličke varijacije imaju za posljedicu učestaliju pojavu detonantnog izgaranja, a njihova pojava je izraženija kod siromašne smjese. Slika 5 prikazuje cikličke varijacije tlaka u uzastopnim ciklusima u cilindru Ottova motora.



Slika 5. Varijacije tlaka u uzastopnim ciklusima u cilindru Ottovog motora [4]

Veliku pozornost treba posvetiti i oblikovanju prostora izgaranja, hlađenju glave motora te primjeni goriva otpornih prema samozapaljenju. Otpornost goriva prema samozapaljenju iskazuje se oktanskim brojem (OB), pri čemu veći oktanski broj znači veću otpornost prema samozapaljenju. Konstruktivnim mjerama u usisnom kanalu i prostoru izgaranja može se podići razina turbulencije u smjesi. Veća razina turbulencije u smjesi uzrokuje kraće vrijeme izgaranja, odnosno smanjuje vjerojatnost formiranja detonantnog izgaranja.

Utjecaj produkata izgaranja na pojavu detonantnog izgaranja ovisi o njihovoj temperaturi i masenom udjelu u svježoj smjesi. Sklonost motora detonantnom izgaranju može se smanjiti miješanjem svježije smjese goriva i zraka s ohlađenim produktima izgaranja jer će ohlađeni produkti izgaranja trošiti toplinu na svoje zagrijavanje i tako smanjiti temperaturu smjese u cilindru [2].

2.3. Modeliranje detonantnog izgaranja

Osnovni princip modeliranja detonantnog izgaranja temelji se na modeliranju pojave samozapaljenja neizgorjele smjese.

Postoje četiri različita pristupa modeliranju detonantnog izgaranja:

- empirijski model zasnovan na Arrheniusovoj funkciji,
- modeliranje ponašanja smjese detaljnim modeliranjem kemijskih reakcija u smjesi,
- modeliranje pojave samozapaljenja s reduciranim modelom kemijskih reakcija u smjesi,

- tablični model goriva s vrijednostima vremenskog intervala do pojave samozapaljenja smjese.

Jedan od najčešće korištenih modela je model koji se temelji na poznavanju vremenskog intervala do pojave samozapaljenja smjese, a modeliran je empirijskim izrazom temeljenim na Arrheniusovoj funkciji. Prema jednadžbi (1) Arrheniusova funkcija ovisi o tlaku, temperaturi i oktanskom broju goriva. Trenutak pojave samozapaljenja modelira se veličinom koja se naziva integral detonantnog izgaranja (engl. *Knock Integral*). Integral detonantog izgaranja određuje se na temelju vremenske integracije recipročne vrijednosti vremenskog intervala do pojave samozapaljenja i njime se određuje trenutak kada se formirala kritična koncentracija slobodnih radikala koji uzrokuju pojavu samozapaljenja. Nedostatak ovakvog modeliranja pojave detonantnog izgaranja je nemogućnost obuhvaćanja pojave niskotemperaturnog izgaranja.

Detaljnim kemijsko kinetičkim modelima želi se što bolje obuhvatiti pojava niskotemperaturnog izgaranja i negativna temperaturna karakteristika smjese goriva i zraka. Međutim, ovakvi modeli su vrlo zahtjevni što se tiče proračunskog vremena, stoga su razvijeni reducirani modeli kemijskih reakcija u smjesi. Takvi modeli su manje kompleksni i manje računalno zahtjevni, a imaju zadovoljavajuću točnost.

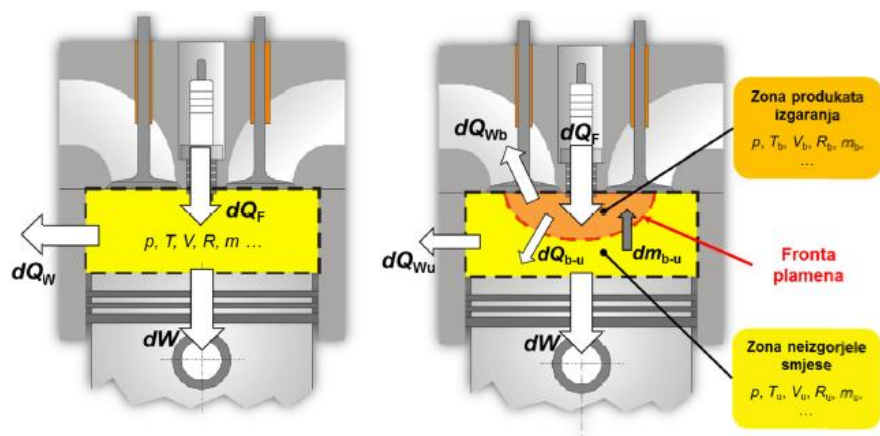
Primjena tabličnog zapisa vremenskog intervala do pojave samozapaljenja smjese goriva i zraka omogućuje značajno smanjenje proračunskog vremena uz neznatno lošiju razinu opisa kemijske reaktivnosti smjese.

2.4. 1-D/0-D modeli Ottovog motora

3-D CFD simulacije nenadmašne su u detaljiranju pojava i daju odgovore koji se često ne mogu dobiti jednostavnim 0-D/1-D alatima. Međutim, vrlo su kompleksne te imaju visoke zahtjeve za računalnom snagom i vremenom, a za razvojne inženjere upravo je vrijeme dominantan faktor.

1-D/0-D simulacijski modeli dijele se na jednozonske i dvozonske modele. Kod jednozonskih modela prostor izgaranja promatra se kao jedna homogena zona s izotropnim svojstvima tvari te se zanemaruju utjecaji geometrije prostora izgaranja na propagaciju fronte plamena. U dvozonskom modelu prostor izgaranja podijeljen je na dvije zone, zonu plinova nastalih izgaranjem i zonu još neizgorjele smjese, a dijeli ih fronta plamena. Zone se modeliraju kao zasebni termodinamički sustavi na koje se primjenjuju prvi zakon termodinamike, jednadžba stanja idealnog plina i zakon očuvanja mase. Posebnu grupu dvozonskih modela izgaranja čine kvazi-dimenzionalni modeli koji uzimaju u obzir utjecaj oblika prostora izgaranja na slobodnu

površinu fronte plamena. Brzina izgaranja kod kvazi-dimenzijskih modela ovisi u najvećoj mjeri o turbulentnim veličinama koje se modeliraju primjenom podmodela turbulencije. Slikom 6 prikazan je lijevo jednozonski model, a desno dvozonski model.



Slika 6. Jednozonski model (lijevo) i dvozonski model (desno) [4]

3. NOVI MODEL DETONANTNOG IZGARANJA

Na Katedri za motore i vozila Fakulteta strojarstva i brodogradnje razvijen je novi model detonantnog izgaranja za dvozonске 0-D modele izgaranja u Ottovom motoru. Zadatak modela je detekcija pojave samozapaljenja u neizgorjeloj smjesi tijekom simulacije izgaranja i procjena intenziteta detonantnog izgaranja. Model ima sljedeće značajke:

- simulacija temperaturne nehomogenosti neizgorjele smjese
- određivanje trenutka pojave samozapaljenja i niskotemperaturne oksidacije goriva na temelju tabličnog prikaza zakašnjenja samozapaljenja smjese
- modeliranje izgaranja uslijed samozapaljenja i izgaranja uslijed pojave niskotemperaturne oksidacije goriva
- procjena intenziteta detonantnog izgaranja

Model uvjete za pojavu samozapaljenja računa na temelju tlaka u cilindru (p_{cil}), temperature u zoni neizgorjele smjese (T_{NS}), faktora zraka (λ) i masenog udjela produkata izgaranja u zoni neizgorjele smjese ($x_{PI,NS}$) izračunatih modelom izgaranja.

Ako se tijekom proračuna izgaranja u zoni neizgorjele smjese jave uvjeti za pojavu samozapaljenja, rezultat modela je kut zakreta koljenastog vratila u trenutku pojave samozapaljenja (α_{det}) i bezdimenzijska vrijednost koja predstavlja procjenu intenziteta detonantnog izgaranja IoK (engl. *Intensity of Knock*).

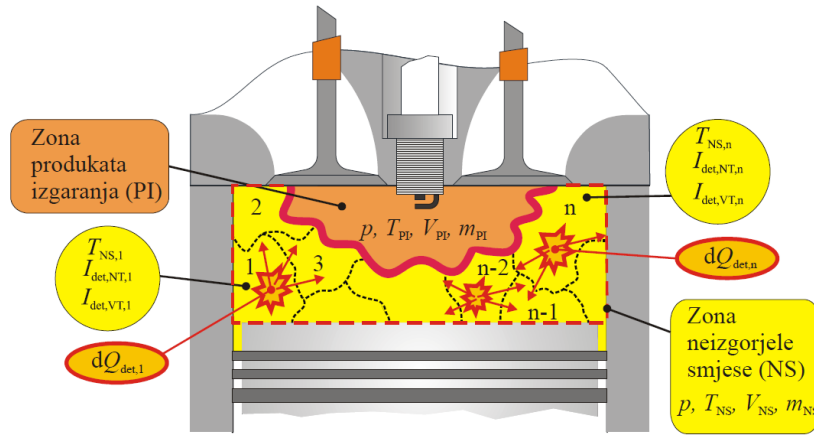
Model je podijeljen u tri podmodela:

- podmodel za simulaciju temperaturne raspodjele,
- podmodel za detekciju pojave samozapaljenja
- podmodel za simulaciju detonantnog izgaranja.

3.1. Podmodel temperaturne raspodjele

Podmodelom temperaturne raspodjele simulira se temperaturna nehomogenost u zoni neizgorjele smjese. Zona neizgorjele smjese termodinamičkog dvozonskog modela podijeljena je u proizvoljan broj podzona. Svaka podzona ima različitu temperaturu, ali istu masu i sastav.

$$m_1 = m_2 = \dots = m_n = \frac{m_{NS}}{n_Z} \quad (2)$$



Slika 7. Podjela zone u podzone [4]

Temperaturna raspodjela u zoni neizgorjele smjese simulirana je normalnom razdiobom oko srednje temperature zone neizgorjele smjese, pri čemu korisnik mora definirati najveću standardnu devijaciju temperature u neizgorjeloj zoni tijekom izgaranja ($\sigma_{T,max}$) i broj podzona (n_Z). Najveća standardna devijacija određuje najveću i najmanju temperaturu koja se tijekom izgaranja javlja u neizgorjeloj smjesi, odnosno fizikalno predstavlja najveću temperaturnu slojevitost neizgorjele smjese tijekom izgaranja. Najveća i najmanja temperatura neizgorjele smjese određuje se iz jednadžbe (3) na temelju poznate srednje temperature neizgorjele smjese:

$$\frac{\Delta T_{VT}}{\overline{T}_{NS}} = a \left(1 - \frac{1}{100 \cdot (1 - x_{izg}) + 1} \right) \quad (3)$$

gdje je:

x_{izg} – udio izgorjelog goriva u cilindru

ΔT_{VT} – razlika između najviše i srednje temperature neizgorjele smjese, K

\overline{T}_{NS} – srednja temperatura neizgorjele smjese, K

Parametar a u izrazu (3) je funkcija najveće standardne devijacije i različit je za različite motore i uvjete rada.

3.2. Podmodel za detekciju pojave samozapaljenja

Podmodel za detekciju samozapaljenja računa je li se u neizgorjeloj smjesi formirala dovoljna količina slobodnih radikala za samozapaljenje smjese, a pretpostavka modela je da samozapaljenje u neizgorjeloj smjesi uvijek uzrokuje pojavu detonantnog izgaranja. Za računanje je li u neizgorjeloj smjesi došlo do pojave samozapaljenja podmodel koristi dva

integrala detonantnog izgaranja KI (engl. *Knock Integral*), jedan za računanje pojave niskotemperaturnog samozapaljenja, a drugi za računanje pojave visokotemperaturnog samozapaljenja. Pojava samozapaljenja provjerava se u svakoj od podzona.

$$KI_{NT,i} = \int_{t_{PI}}^t \frac{dt}{\tau_{in,NT,i}} \quad (4)$$

$$KI_{VT,i} = \int_{t_{PI}}^t \frac{dt}{\tau_{in,VT,i}} \quad (5)$$

pri čemu su:

$\tau_{in,NT,i}$ – vrijeme iniciranja niskotemperaturnog samozapaljenja, [s],

$\tau_{in,VT,i}$ – vrijeme iniciranja visokotemperaturnog samozapaljenja, [s],

i - indeks podzone modela

t_{PI} – vrijeme početka izgaranja, [s]

t – vrijeme do pojave detonantnog izgaranja, [s]

Podatke o vremenima iniciranja samozapaljenja podmodel dobiva interpolacijom vrijednosti iz posebno pripremljenih tablica s vremenima samozapaljenja za niskotemperaturno samozapaljenje i visokotemperaturno samozapaljenje, a funkcija su četiri parametra: tlaka (p), temperature (T), faktora zraka (λ) i masenog udjela produkata izgaranja (x_{PI}). Ta vremena dobivena su detaljnim modelom kinetike kemijskih reakcija u smjesi goriva i zraka. U tablicama su pohranjene i ukupna specifična toplinska energija oslobođena samozapaljenjem (Q_{uk}) te specifična toplinska energija oslobođena niskotemperaturnim samozapaljenjem (Q_{NT}). Udio toplinske energije oslobođene niskotemperaturnim izgaranjem računa se prema izrazu 6:

$$r_{NT} = \frac{Q_{NT}}{Q_{uk}} \quad (6)$$

Do pojave samozapaljenja dolazi kada vrijednost integrala detonantnog izgaranja postigne graničnu vrijednost (GV) koja obično iznosi $GV = 1$.

Kada je vrijednost integrala detonantnog izgaranja za niskotemperaturno samozapaljenje jednaka graničnoj vrijednosti ili veća od nje ($KI_{NT,i} \geq GV$) podmodel za procjenu intenziteta detonantnog izgaranja simulira niskotemperaturno oslobađanje topline. Kada vrijednost integrala detonantnog izgaranja za visokotemperaturno samozapaljenje dosegne graničnu

vrijednost ($KI_{VT,i} \geq GV$) kut zakreta koljenastog vratila u tom trenutku zabilježi se kao trenutak pojave detonantnog izgaranja (α_{det}), a u podmodelu za procjenu intenziteta detonantnog izgaranja počinje simulacija visokotemperaturnog oslobađanja topline.

3.3. Podmodel za procjenu intenziteta detonacije

Ovim podmodelom određuje se ponašanje modela kada je detonantno izgaranje detektirano. U podmodelu se mogu odvijati dva tipa proračuna ovisno radi li se o niskotemperaturnom samozapaljenju ($KI_{NT,i} \geq GV$) ili visokotemperaturnom samozapaljenju ($KI_{VT,i} \geq GV$):

- proračun tlaka i temperature uslijed detonantnog izgaranja
- proračun intenziteta detonantnog izgaranja

3.3.1. Proračun tlaka i temperature uslijed detonantnog izgaranja

Kada se u nekoj od podzona zone neizgorjele smjese pojavi samozapaljenje, započinje simulacija izgaranja u toj podzoni. Brzina oslobađanja topline u svakoj podzoni računa se izrazom:

$$\frac{dQ_{det,i}}{d\alpha} = Q_{G,i} \cdot (r_{NT,i})^A \cdot \frac{dx_{VIBE,i}}{d\alpha} \quad (7)$$

pri čemu je:

$Q_{G,i}$ - ukupna energija goriva u podzoni i , [J],

A - faktor tipa izgaranja (1 - niskotemperaturno izgaranje, 0 – samozapaljenje)

$r_{NT,i}$ - udio energije oslobođene niskotemperaturnim izgaranjem

$\frac{dx_{VIBE,i}}{d\alpha}$ - normalizirana brzina oslobađanja topline u podzoni, [$1/^\circ\text{KV}$],

α - kut zakreta koljenastog vratila, [$^\circ\text{KV}$],

i - indeks podzone modela.

Normalizirana brzina oslobađanja topline ($dx_{VIBE,i}/d\alpha$) računa se na temelju Vibe-ove funkcije za vrlo kratko vrijeme izgaranja. Jednadžba (7) koristi se i za simulaciju niskotemperaturnog i za simulaciju visokotemperaturnog izgaranja. Kada se u nekoj podzoni postignu uvjeti za niskotemperaturno izgaranje, faktor tipa izgaranja poprima vrijednost $A = 1$ te se ukupna energija u gorivu sadržanom u podzoni množi s udjelom energije koja se oslobađa niskotemperaturnim izgaranjem ($r_{NT,i}$), pri čemu se $r_{NT,i}$ računa prema izrazu (6). Kada se u

podzoni postignu uvjeti za visokotemperaturno izgaranje, faktor tipa izgaranja $A = 0$ te je energija koja se oslobodi visokotemperaturnim izgaranjem jednaka preostaloj energiji goriva u podzoni.

Ukupna brzina oslobađanja topline detonantnim izgaranjem cijele zone neizgorjele smjese računa se zbrajanjem brzina oslobađanja topline svih podzona modela:

$$\frac{dQ_{det}}{d\alpha} = \sum_{i=1}^n \frac{dQ_{det,i}}{d\alpha} \quad (8)$$

Ukupna brzina oslobađanja energije detonantnim izgaranjem dodaje se energijskoj jednadžbi zone neizgorjele smjese te se tako povećava temperatura neizgorjele smjese i potiče pojava samozapaljenja u drugim podzonama.

3.3.2. Proračun intenziteta detonantnog izgaranja

Kod eksperimentalnih analiza detonantnog izgaranja intenzitet detonacije određuje se na temelju izmjerenih oscilacija tlaka u cilindru. Kao mjera intenziteta detonantnog izgaranja najčešće se koristi MAPO, tj. najveća amplituda oscilacija tlaka uzrokovanih detonantnim izgaranjem.

Oscilacije tlaka uzrokovane pojavom detonantnog izgaranja se ne simuliraju novim modelom detonantnog izgaranja nego se intenzitet detonantnog izgaranja procjenjuje na temelju mase neizgorjelog goriva, volumena cilindra u trenutku pojave visokotemperaturnog samozapaljenja i brzine vrtnje motora. Za izračunavanje intenziteta detonacije IoK (engl. *Intensity of Knock*) koristi se jednadžba :

$$IoK = K_1 \cdot \frac{m_{gor,det}}{m_{gor,uk}} \cdot (\varepsilon - 1) \cdot \sqrt{1 - \frac{\alpha_{det}}{K_2}} \cdot n \quad (9)$$

pri čemu su:

K_1 – konstanta za podešavanje mjera, [min],

$m_{gor,det}$ – masa goriva u cilindru u trenutku pojave samozapaljenja, [kg],

$m_{gor,uk}$ – masa goriva u cilindru na početku izgaranja, [kg],

K_2 – granica čujnosti detonacije, °KV nakon GMT

α_{det} – kut zakreta koljenastog vratila u trenutku pojave samozapaljenja, [°KV]

ε – kompresijski omjer

n – brzina vrtnje, [1/min]

4. VALIDACIJA NOVOG MODELA DETONANTNOG IZGARANJA

Novi model detonantnog izgaranja validiran je u standardnom radu Ottovog motora, međutim nije validiran pri radu motora s povišenim udjelima EGR-a. Budući da je EGR sustav postao neizostavan dio Ottovih motora, model je potrebno validirati i u tom načinu rada motora.

Za validaciju novog modela detonantnog izgaranja korišteni su rezultati mjerenja provedenih na eksperimentalnom motoru u Laboratoriju za motore i vozila na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, te je izrađen simulacijski model motora na kojem će se provesti validacija.

4.1. Eksperimentalni motor

Eksperimentalna mjerenja provedena su na eksperimentalnom motoru HATZ 1D81. HATZ 1D81 je zrakom hlađeni jednocilindarski četverotaktni motor. Motor je originalno konstruiran za Dieslov način rada, no prenamijenjen je kako bi mogao raditi i u Ottovom režimu. Osnovne karakteristike motora navedene su u tablici 1.

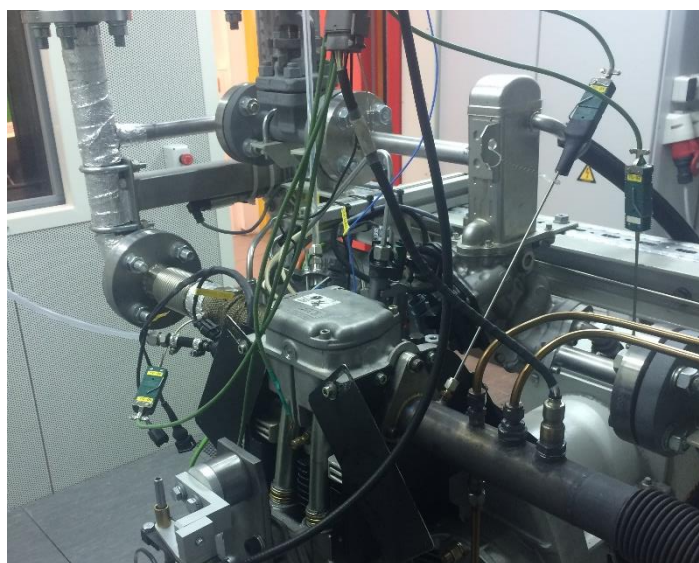
Tablica 1 Karakteristike eksperimentalnog motora

Tip motora	HATZ 1D81
Broj taktova	4
Broj cilindra	1
Promjer cilindra D , mm	100
Hod klipa H , mm	85
Radni volumen cilindra V_H , cm ³	667
Broj ventila	2
Kompresijski omjer ε	12:1
Priprema smjese	Direktno ubrizgavanje u usis



Slika 8. Hatz 1D81[5]

Na motoru je ugrađen EGR sustav s njegovim komponentama: ventil kojim se određuje udio ispušnih plinova koji se vraćaju u usisnu granu, hladnjak koji omogućuje regulaciju temperature ispušnih plinova te cjevovodi. EGR hladnjak je u biti vodom hlađeni izmjenjivač topline.



Slika 9. Motor s EGR sustavom u Laboratoriju za motore i vozila

4.2. Radne točke

Sva mjerenja provedena su pri konstantnoj brzini vrtnje motora od 1600 min^{-1} te s približno stehiometrijskom smjesom goriva i zraka. Kao gorivo koristio se bezolovni i bezsumporni motorni benzin INA BS 95 Class. Svojstva goriva prikazana su tablicom 2.

Tablica 2 Svojstva goriva INA BS 95 Class

Istraživački oktanski broj, IOB	95
Motorni oktanski broj, MOB	85
Gornja ogrjevna vrijednost, H_g	44 MJ/kg
Donja ogrjevna vrijednost, H_d	42,5 MJ/kg

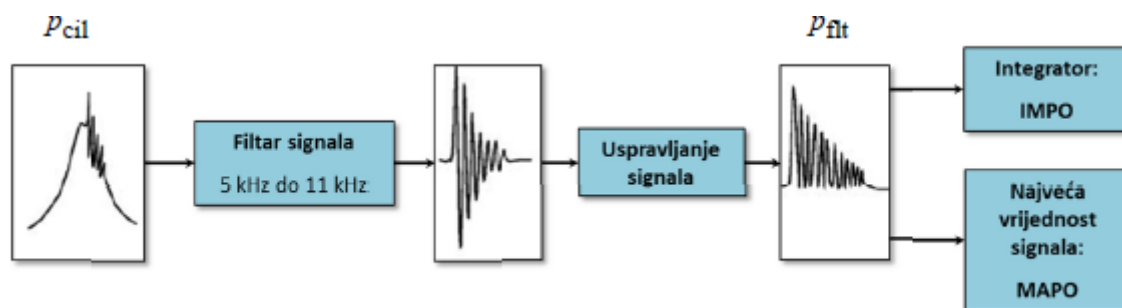
Za svaku radnu točku mjereni su tlak i temperatura na usisu (p_{usis} , T_{usis}), temperatura ispušnih plinova (T_{ispuh}), protok goriva i zraka te tlak u cilindru motora (p_{cil}). Sva mjerenja provedena su nakon određenog vremena rada motora do postizanja stabilnog stanja. Brzina oslobađanja topline izračunata je za svaku izmjerenu točku na temelju snimljenog profila tlaka u cilindru primjenom prvog glavnog stavka termodinamike te uz pretpostavku toplinskih gubitaka kroz stijenke prostora izgaranja. Radne točke razlikuju se po tlaku u usisnoj cijevi, temperaturi u usisnoj cijevi te udjelu EGR-a, a motor se dovodio u stanje detonantnog izgaranja pomicanjem točke paljenja (α_p).

Ukupno je izmjereno jedanaest radnih točaka od koji su dvije bez udjela EGR-a (referentno stanje), pet radnih točaka je s 18% masenog udjela EGR-a i četiri točke s različitim udjelima EGR-a. Rezultati mjerenja radnih točaka nalaze se u tablici 3.

Tablica 3 Radne točke

Radna točka	p_{usis}, bar	T_{usis}, °C	α_p, °KV prije GMT	%EGR
1	0,75	21,76	14	0
2	0,75	21,7	10	0
3	0,86	31,43	25	9,04
4	0,9	71,23	15	9,24
5	0,88	38,32	18	9,45
6	0,88	50,7	18	10,06
7	0,88	18,16	32	18
8	0,93	73,46	20	18
9	0,87	22,1	31	18
10	0,9	22,3	44	18
11	1	83,93	20	18

Pojava detonantnog izgaranja analizirana je na svim izmjerenim radnim točkama. Za eksperimentalnu analizu detonantnog izgaranja postoje mnoge metode, a mogu se podijeliti na direktne i indirektne metode. Direktne metode se zasnivaju na analizi izmjerenih pojava u cilindru kao što su promjena tlaka, ionskih struja i emisije svjetlosti, a indirektne metode se zasnivaju na mjerenju zvuka motora i vibracija bloka motora. Budući da je na eksperimentalnom motoru mjeren tlak u cilindru, analiza detonantnog izgaranja napravljena je na temelju izmjerenih profila tlaka u cilindru. Za procjenu intenziteta detonacije kod eksperimentalne analize koriste se vrijednosti indikatora detonantnog izgaranja MAPO i IMPO. MAPO je najveća amplituda oscilacija tlaka jednog ciklusa, a IMPO je integral oscilacija tlaka za jedan radni ciklus. Vrijednosti ovih indikatora određene su prolaskom snimljenog profila tlaka u cilindru kroz frekvencijski filter (engl. *Band-pass filter*) koji izdvaja frekvencijski spektar oscilacije tlaka u cilindru. Potom su se preko ispravljača dobile vrijednosti MAPO i IMPO. Na slici 10 je prikazana shema određivanja indikatora detonacije.



Slika 10. Određivanje indikatora detonacije [3]

Validacija modela obaviti će se na temelju analize detonantnog izgaranja indikatorom MAPO. Zbog cikličkih varijacija u izgaranju, koje su kod Ottovih motora poprilično izražene, procjena samo jednog ciklusa ispitivane radne točke nije dovoljna za razlikovanje detonirajućih radnih točaka od nedetonirajućih. Da bi se određena radna točka mogla klasificirati kao detonirajuća, treba provjeriti učestalost pojave detonirajućih ciklusa i to na što većem broju radnih ciklusa. Stoga je za svaku radnu točku snimljena promjena tlaka u cilindru za 300 uzastopnih ciklusa. Tablicom 4 prikazane su srednje vrijednosti MAPO za svaku radnu točku, te koliko ciklusa prelazi vrijednost $MAPO = 0,5$ bar, $MAPO = 1$ bar, $MAPO = 1,5$ bar te $MAPO = 2$ bar.

Tablica 4 Vrijednosti MAPO za sve radne točke

Radna točka	Srednji MAPO, bar	MAPO>0,5	MAPO>1	MAPO>1,5	MAPO>2
1	0,58	102	39	18	6
2	0,29	0	0	0	0
3	0,6	92	44	24	13
4	0,63	88	47	31	21
5	0,26	1	0	0	0
6	0,29	15	2	0	0
7	0,29	0	0	0	0
8	0,32	8	1	0	0
9	0,32	0	0	0	0
10	0,56	71	37	21	13
11	0,62	84	37	25	14

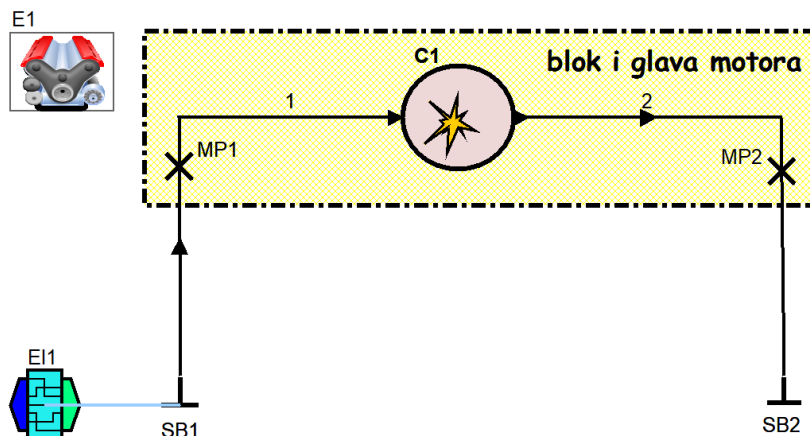
Prema srednjoj vrijednosti MAPO i broju ciklusa koji prelaze u tablici 4 prikazane MAPO vrijednosti radne točke možemo podijeliti na:

- nedetonirajuće radne točke: 2, 7 i 9
- slabo detonirajuće radne točke: 5, 6 i 8
- izrazito detonirajuće radne točke: 1, 3, 4, 10 i 11

Usporedbom tablice 3 i 4 uočava se da radne točke s višim tlakom i višom temperaturom na usisu, te ranijom točkom paljenja smjese goriva i zraka imaju i više detonirajućih ciklusa.

4.3. Opći opis simulacijskog modela

U svrhu validacije novog modela detonantnog izgaranja izrađen je reducirani simulacijski model motora u računalnom programu AVL Boost. Shema modela prikazana je slikom 11.



Slika 11. Model motora u Boost-u

Model motora sastoji se od cilindra (C1), usisnog kanala (linija 1) i ispušnog kanala (linija 2). Rubnim uvjetom na usisnoj strani (SB1) određena je temperatura u usisnoj cijevi i sastav smjese, te se uzima u obzir udio ispušnih plinova koji se vraća preko EGR sustava natrag u usis. Kako bi se što vjernije prenijela dinamika svježije smjese u usisnoj cijevi, izmjereni profil tlaka prenosi se u model pomoću programskog elementa *Engine Interface* (EI1). Rubnim uvjetom na ispušnoj strani (SB2) zadana je izmjerena temperatura ispušnih plinova (T_{ispuh}) i izmjereni tlak u ispušnoj cijevi (p_{ispuh}).

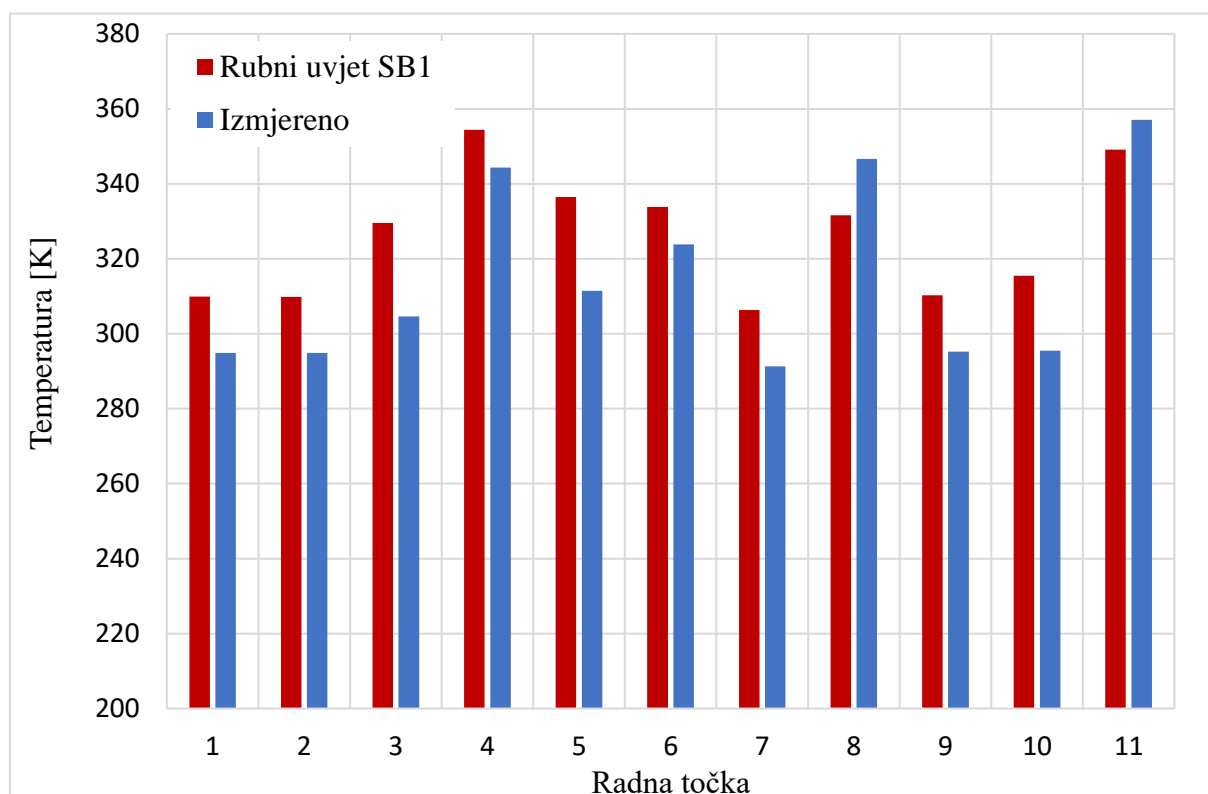
U elementu cilindra (C1) definira se i model izgaranja. Za validaciju novog modela detonantnog izgaranja izabran je tablični model izgaranja. U tablični model se u obliku tablice unose eksperimentalne brzine oslobađanja topline dobivene na temelju izmjerenih profila tlaka u cilindru eksperimentalnog motora za izmjerene radne točke. Za modeliranje odvođenja topline preko stijenki prostora izgaranja korišten je Woschni-ev model prijelaza topline.

4.4. Ocjena primjenjivosti simulacijskog modela

Prije uključivanja novog modela detonacije simulacijski model je potrebno kalibrirati kako bi se postiglo što bolje poklapanje profila tlaka u cilindru, temperature ispuha, protoka goriva i zraka, faktora zraka i drugih parametara dobivenih simulacijom sa izmjerenim vrijednostima na eksperimentalnom motoru. S obzirom da je temperatura veličina koja ima najveću mjernu nesigurnost, temperatura smjese goriva i zraka na usisu izabrana je kao jedan od parametara

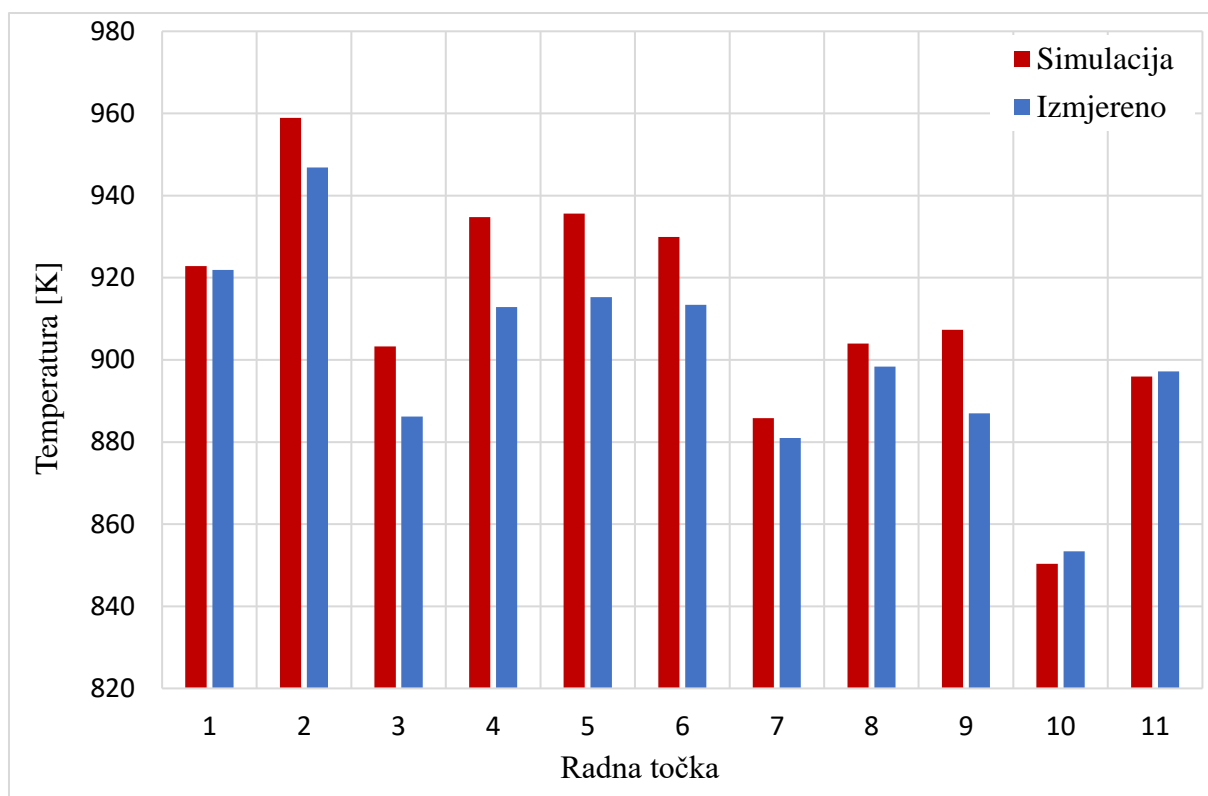
kojim će se podešavati model. Uz temperaturu usisa za svaku radnu točku podešavani su i koeficijent prijelaza topline u prostoru izgaranja te se malo pomicao kut pretpaljenja.

Slika 12 prikazuje razliku između temperatura na usisu izmjerenih na motoru i temperatura koje su zadane na ulaznom rubnom uvjetu SB1 modela kako bi se postiglo što bolje poklapanje drugih parametara. Maksimalna razlika između izmjerene temperature i temperature zadane na rubnom uvjetu SB1 u simulacijskom modelu iznosi 20K što smijemo pripisati mjernoj nesigurnosti termopara kojim je mjerena temperatura na eksperimentalnom motoru.

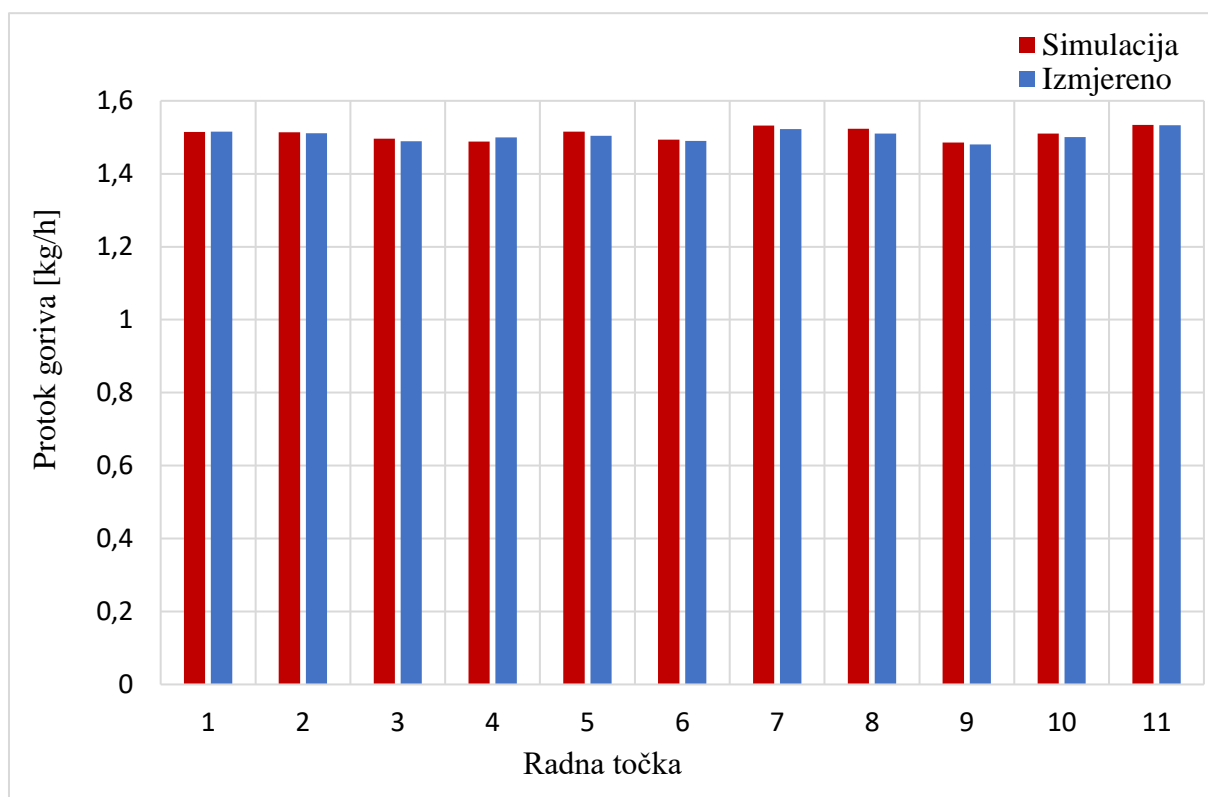


Slika 12. Usporedba zadane temperature na rubnom uvjetu SB1 i temperature na usisu izmjerene na eksperimentalnom motoru

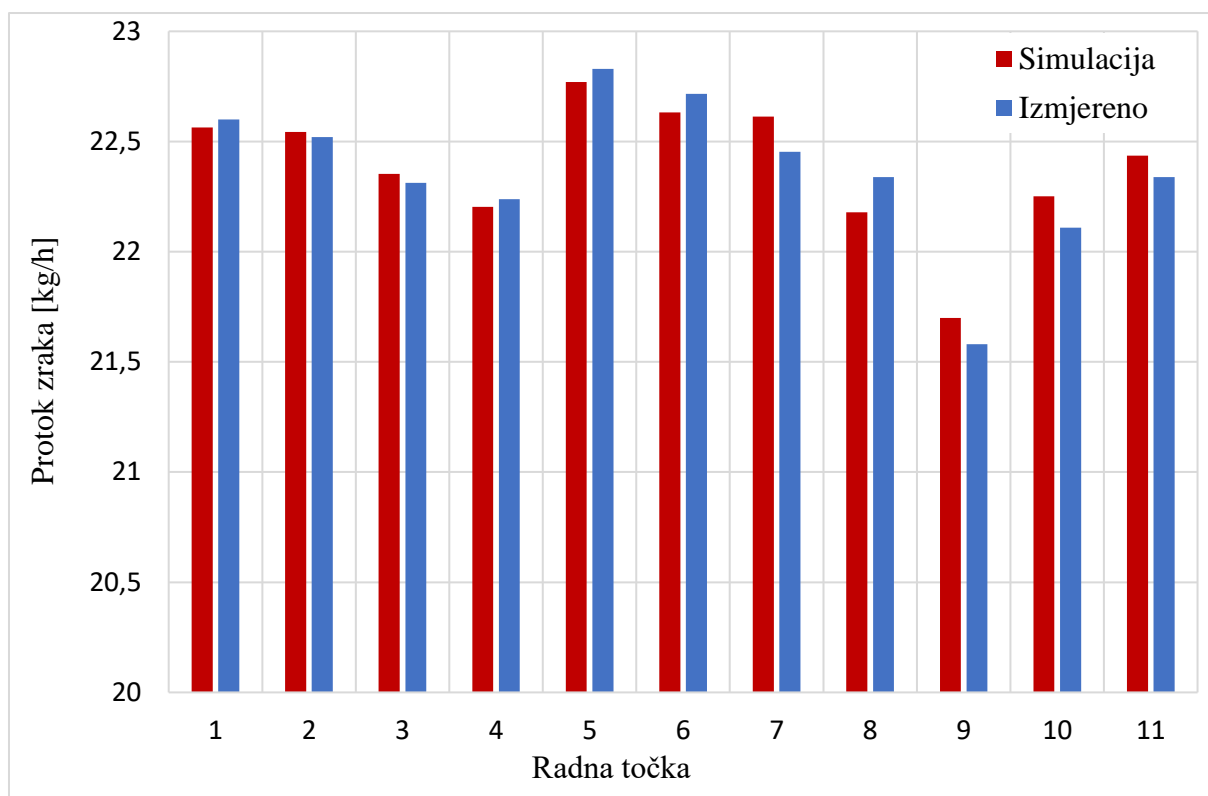
Slijedećim grafikonima prikazane su usporedbe vrijednosti dobivenih simulacijom i izmjerenih vrijednosti za temperaturu ispuha (T_{ispuh}), protok goriva, protok zraka, faktor zraka te profil tlaka u cilindru za svaku radnu točku.



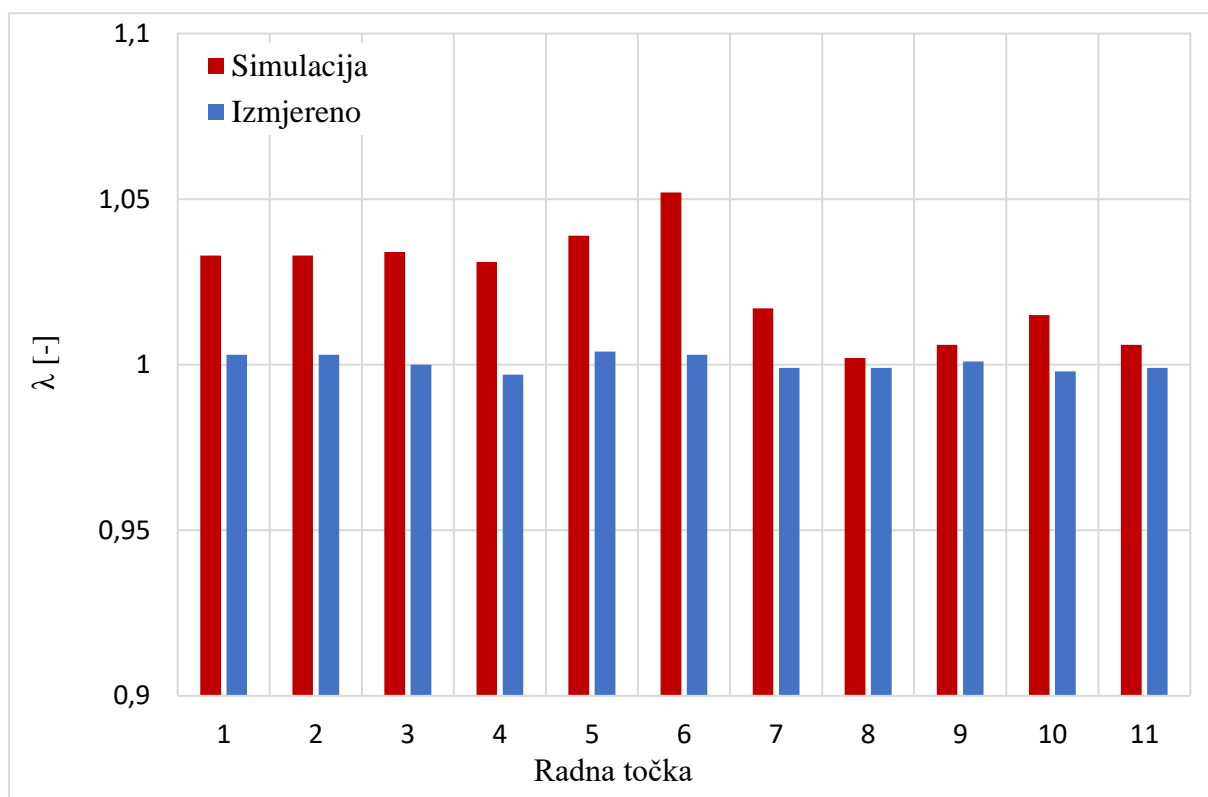
Slika 13. Usporedba simulacijom dobivene temperature ispušnih plinova s izmjerenom temperaturom ispušnih plinova za svaku radnu točku



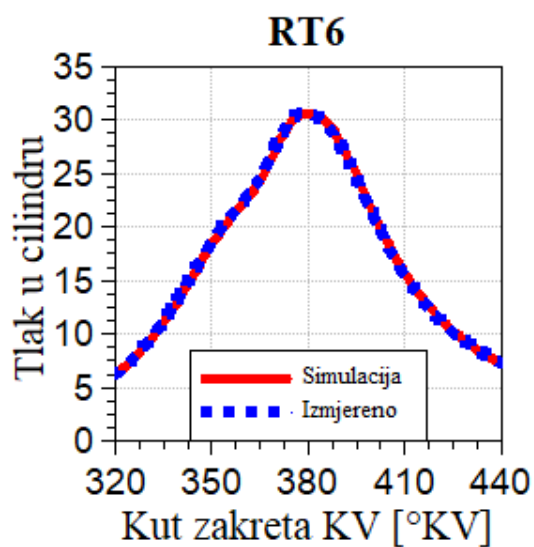
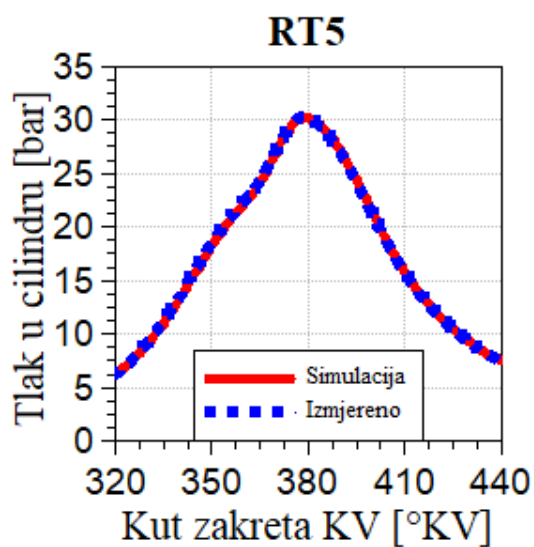
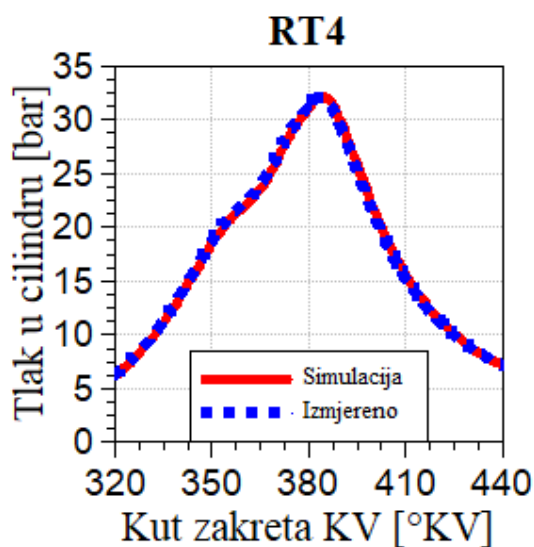
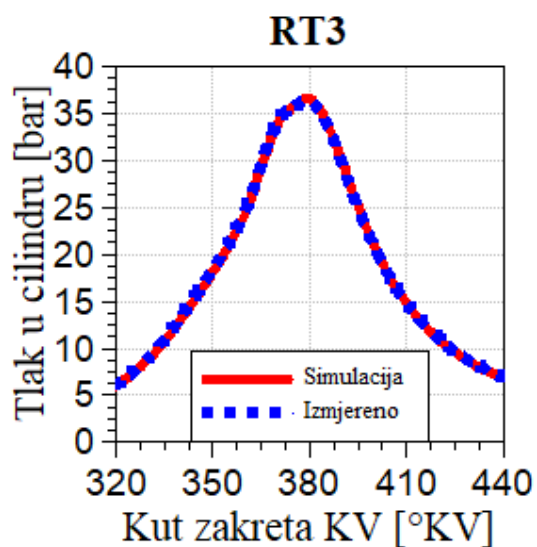
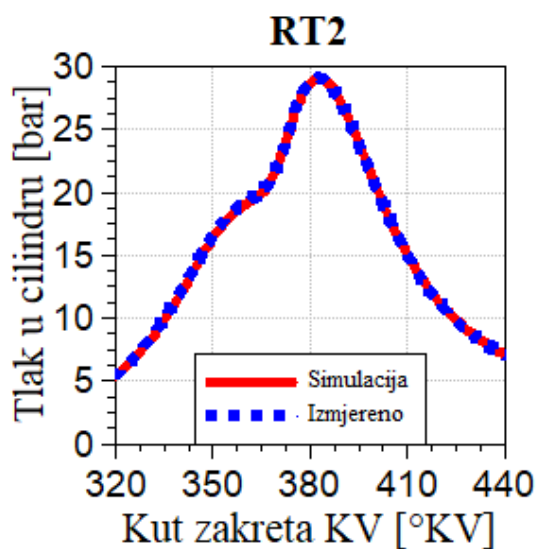
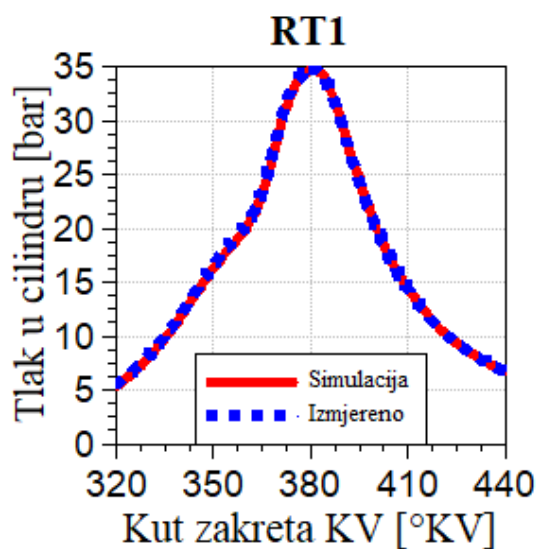
Slika 14. Usporedba simulacijom dobivenog protoka goriva s izmjerenim protokom goriva za svaku radnu točku

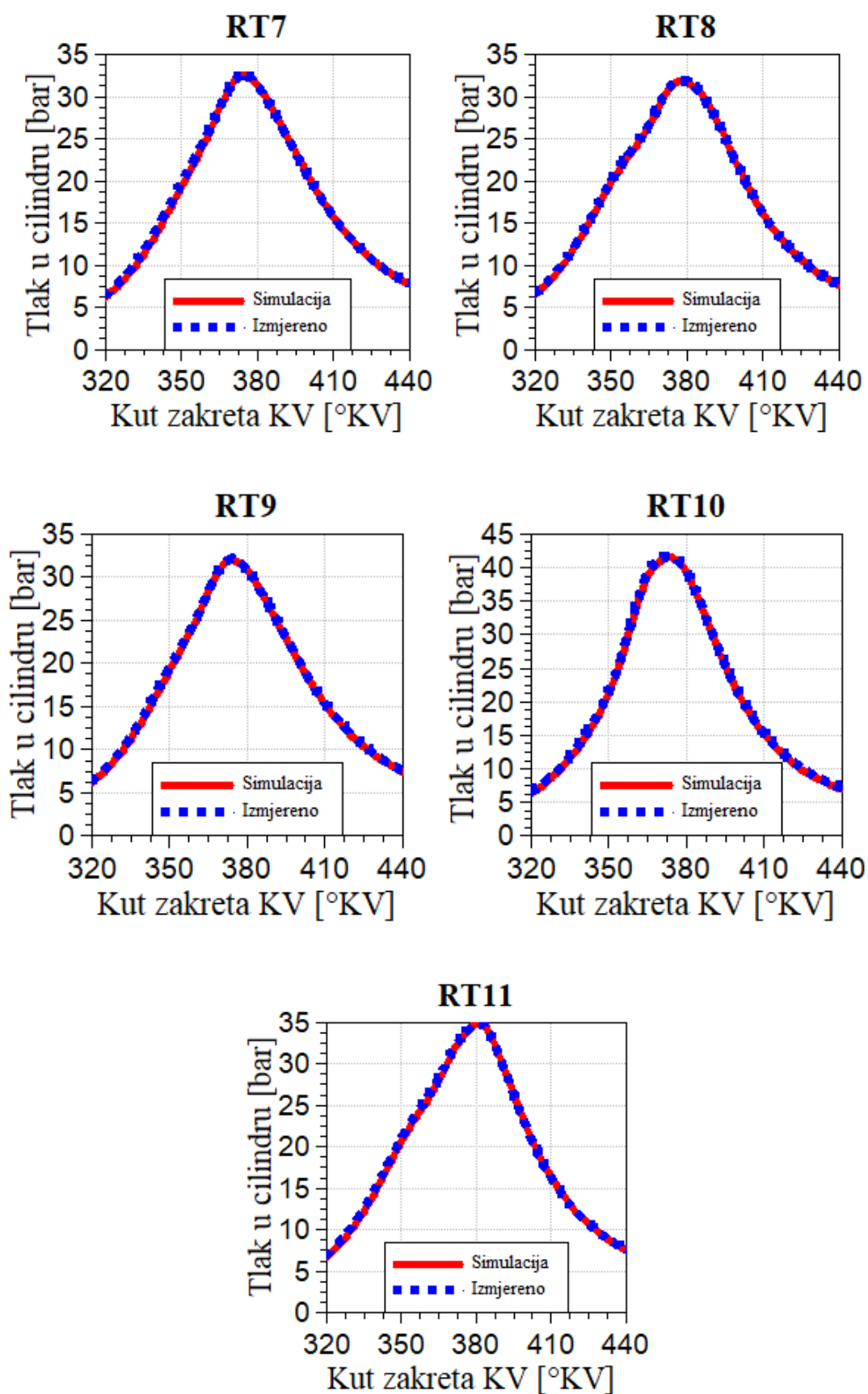


Slika 15. Usporedba simulacijom dobivenog protoka zraka s izmjerenim protok zraka za svaku radnu točku



Slika 16. Usporedba simulacijom dobivenog faktora zraka s izmjerenim faktorom zraka za svaku radnu točku





Slika 17. Usporedba profila tlaka u cilindru dobivenog simulacijom i izmjenom

Iz prikazanih rezultata vidi se da postoji određena razlika između vrijednosti dobivenih simulacijom i izmjerenih vrijednosti temperature ispuha, protoka zraka, protoka goriva i faktora zraka. Nadalje, uočljivo je da se profil tlaka dobiven simulacijskim modelom odlično poklapa (linija crvene boje) s eksperimentalnim profilom (linija plave boje). Razlike između vrijednosti parametara temperature ispuha, protoka goriva i zraka, te faktora zraka dobivenih simulacijom i izmjerenih mogu biti posljedica pogreške mjernog instrumenta, ali i greška simulacije. Međutim, uočljivo je da su te razlike minimalne stoga možemo zaključiti da simulacijski model dobro opisuje rad motora te možemo prijeći na idući korak, a to je uključivanje novog modela detonantnog izgaranja.

4.5. Kalibracija modela detonantnog izgaranja

Novi model detonantnog izgaranja ima dva kalibracijska parametra, najveću standardnu devijaciju temperature u neizgorjeloj zoni $\sigma_{T,max}$ i graničnu vrijednost integrala detonantnog izgaranja KI. Za validaciju modela kao referentne točke poslužile su radna točka 1 i radna točka 2, odnosno točke kod koji ih je udio EGR-a nula, pri čemu je radna točka 1 detonirajuća dok je radna točka 2 nedetonirajuća. Kalibracija modela vršena je na način da se tražila kombinacija vrijednosti najveće standardne devijacije temperature u neizgojeloj zoni i granične vrijednosti integrala detonantnog izgaranja za koje će model detonantnog izgaranja kao rezultat u radnoj točki 1 dati neku vrijednost intenziteta detonantnog izgaranja IoK, a da je pri tome intenzitet detonacije u radnoj točki 2 jednak nula. U tablici 5 prikazane su kombinacije $\sigma_{T,max}$ i KI za koje se dobio željeni rezultat. Pronađeno je ukupno šest kombinacija $\sigma_{T,max}$ i KI, te je u idućem koraku provedena simulacija svih izmjerenih radnih točaka za sve kombinacije $\sigma_{T,max}$ i KI. Validacija modela provedena je uspoređivanjem vrijednosti MAPO iz eksperimenta i vrijednosti intenziteta detonantnog izgaranja IoK te kuta zakreta koljenastog vratila u trenutku pojave detonantnog izgaranja. Dodatno je u rezultatima za svaku radnu točku prikazan i oktanski broj pri kojem neće doći do detonacije. Rezultati su prikazani u sljedećem poglavlju.

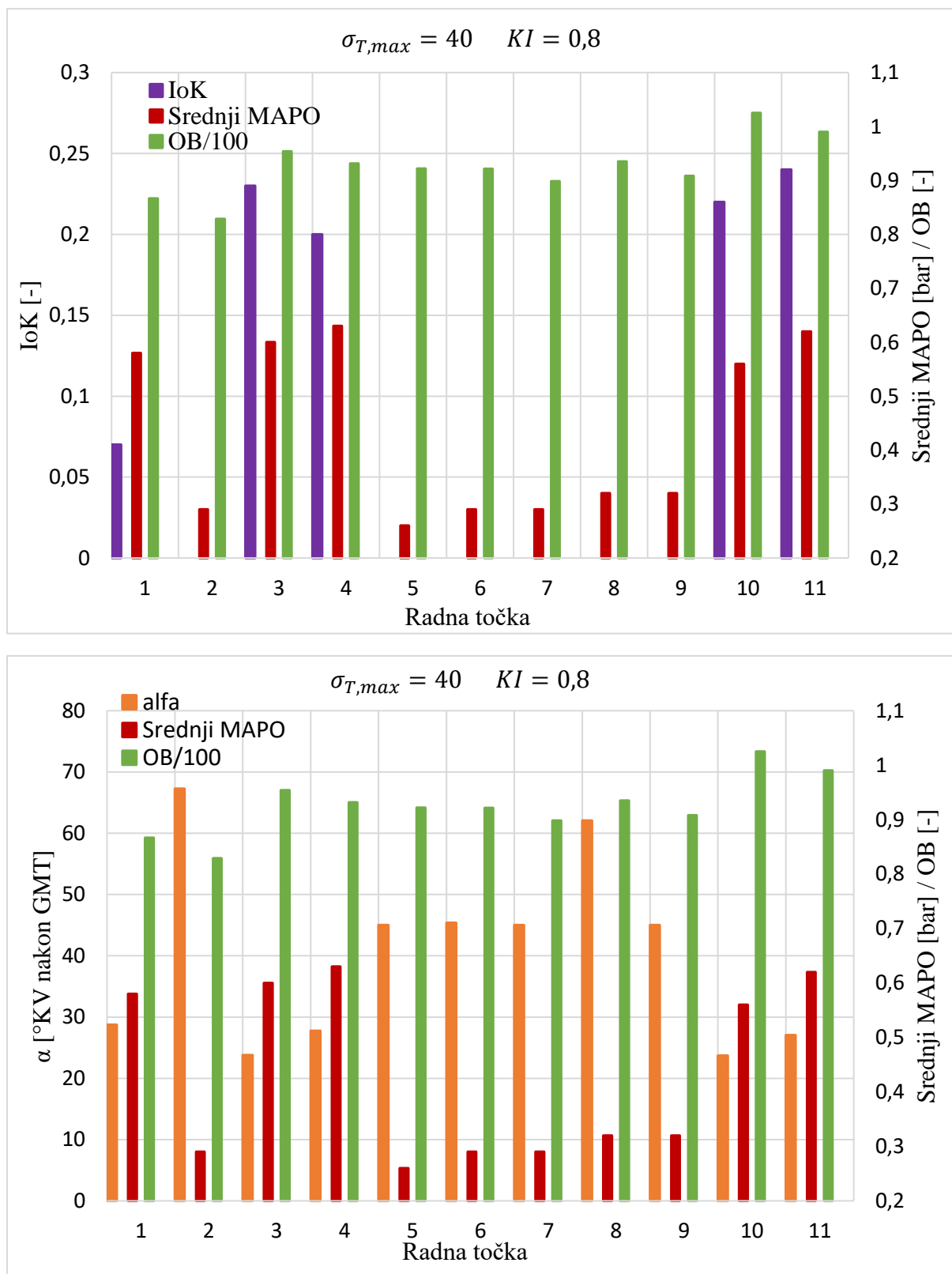
Tablica 5 Kombinacije $\sigma_{T,max}$ i KI

$\sigma_{T,max}, K$	KI	$\sigma_{T,max}, K$	KI
40	0,8	60	0,95
45	0,85	35	0,75
55	0,9	30	0,7

4.6. Rezultati validacije modela

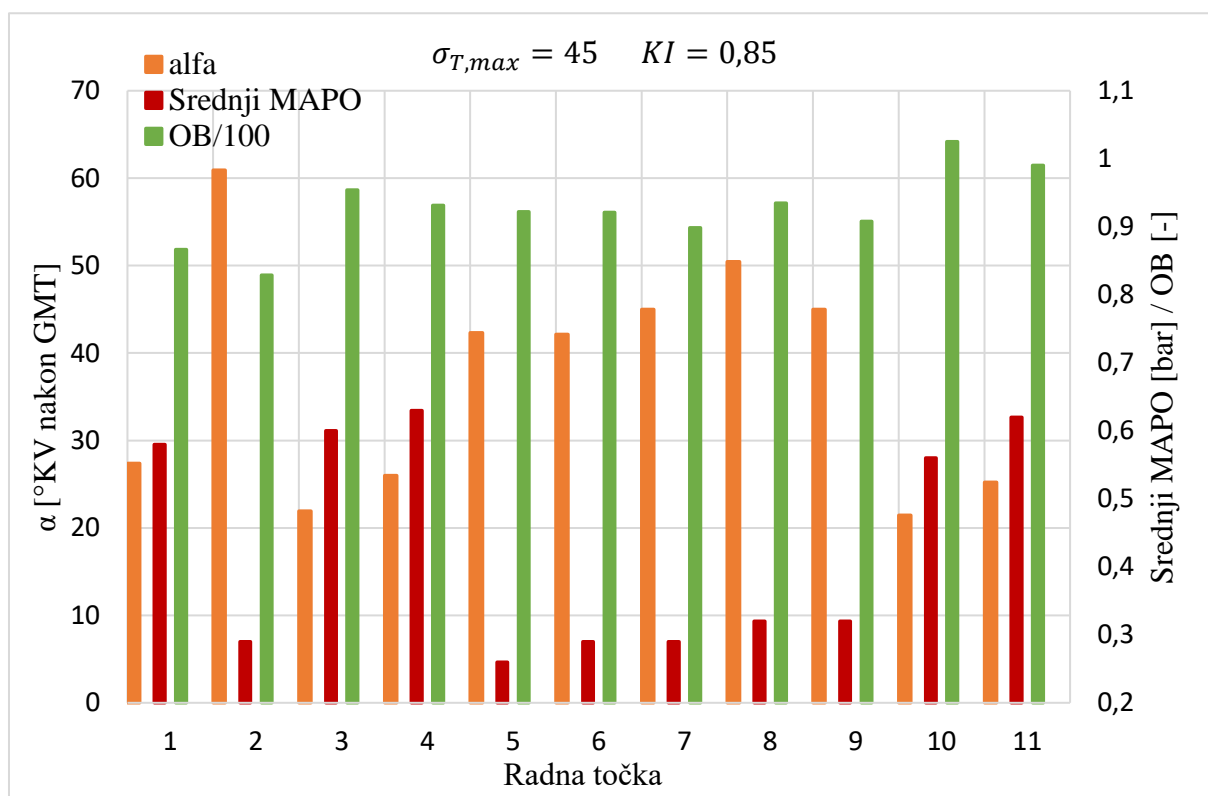
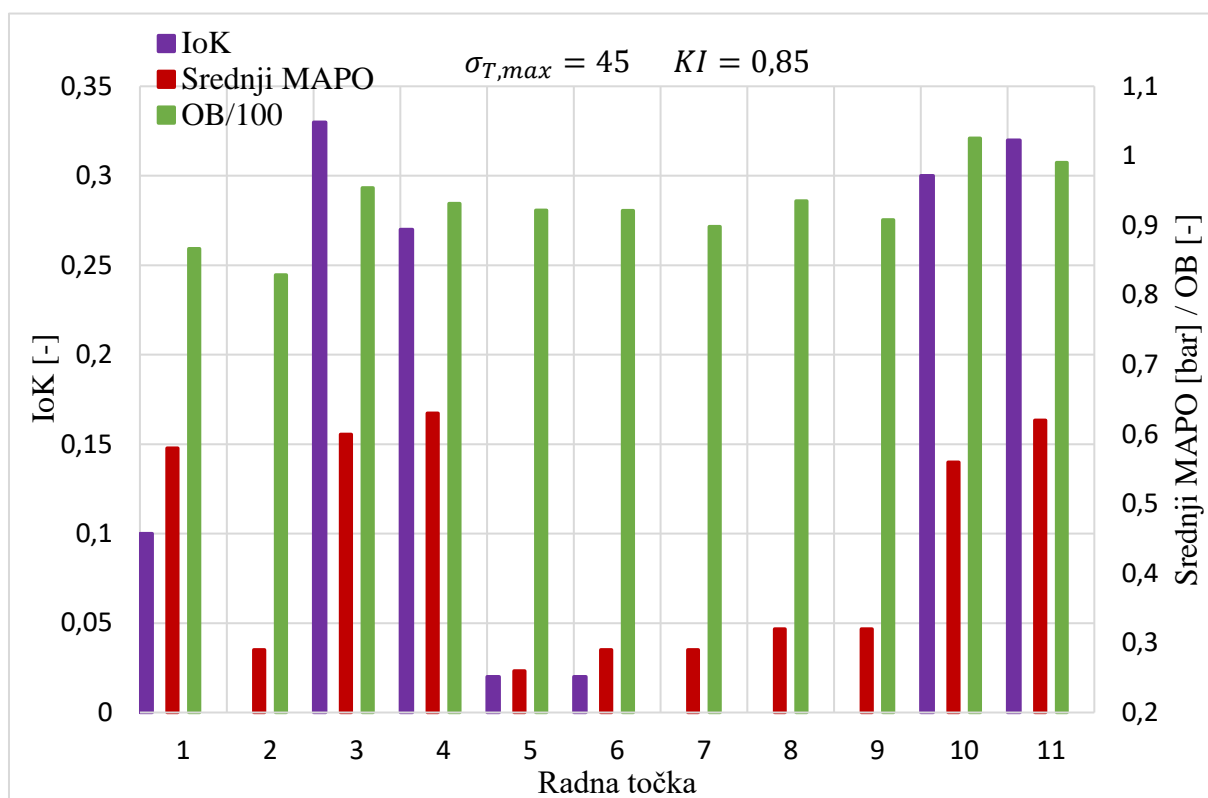
Vrijednost oktanskog broja u svim dijagramima podijeljena je sa sto radi lakšeg prikaza.

- Kombinacija: $\sigma_{T,max} = 40$, $KI = 0,8$



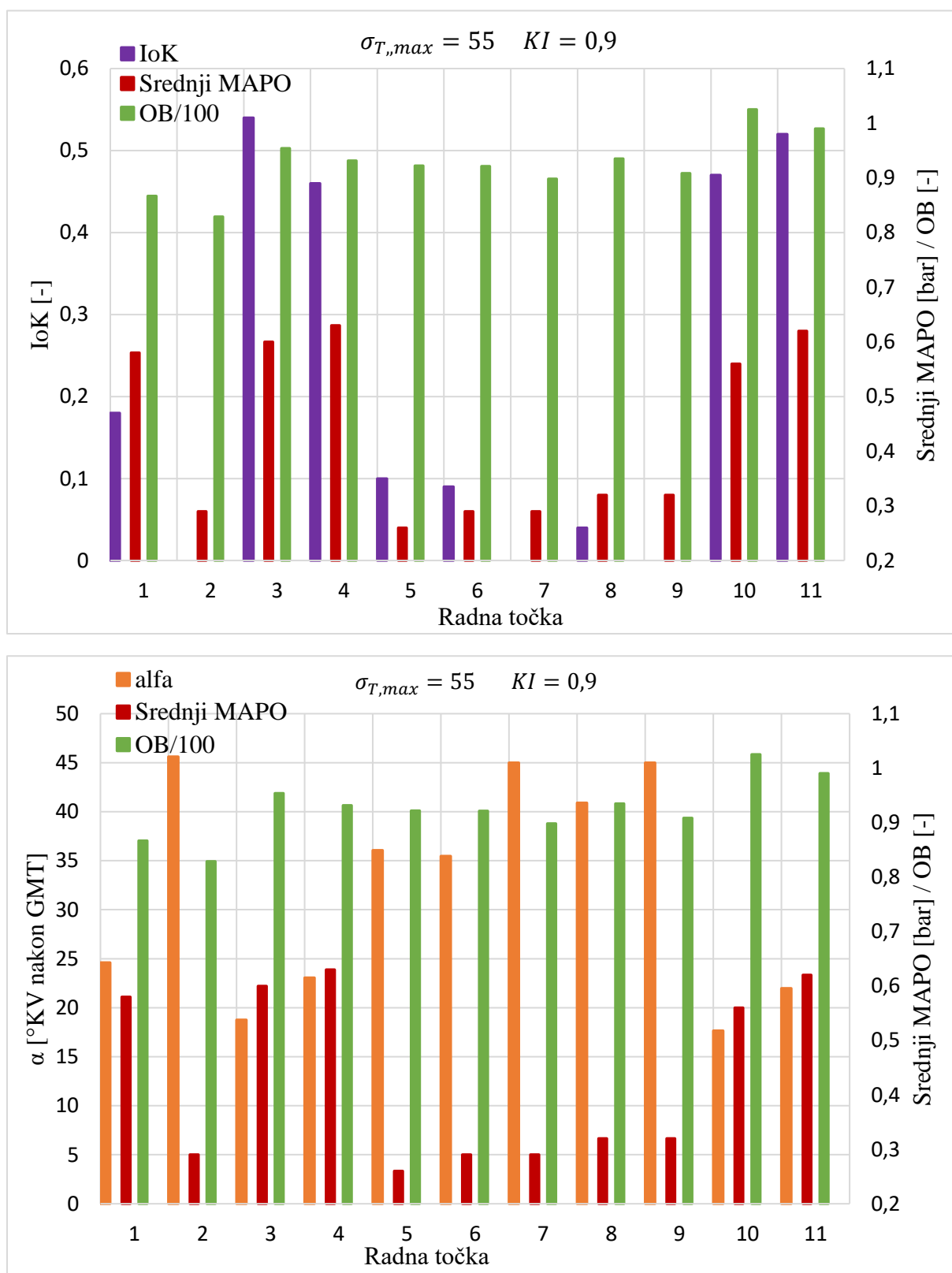
Slika 18. Usporedba MAPO i OB s IoK i α_{det} za $\sigma_{T,max}=40$ i $KI=0,8$

- Kombinacija: $\sigma_{T,max} = 45$, $KI = 0,85$



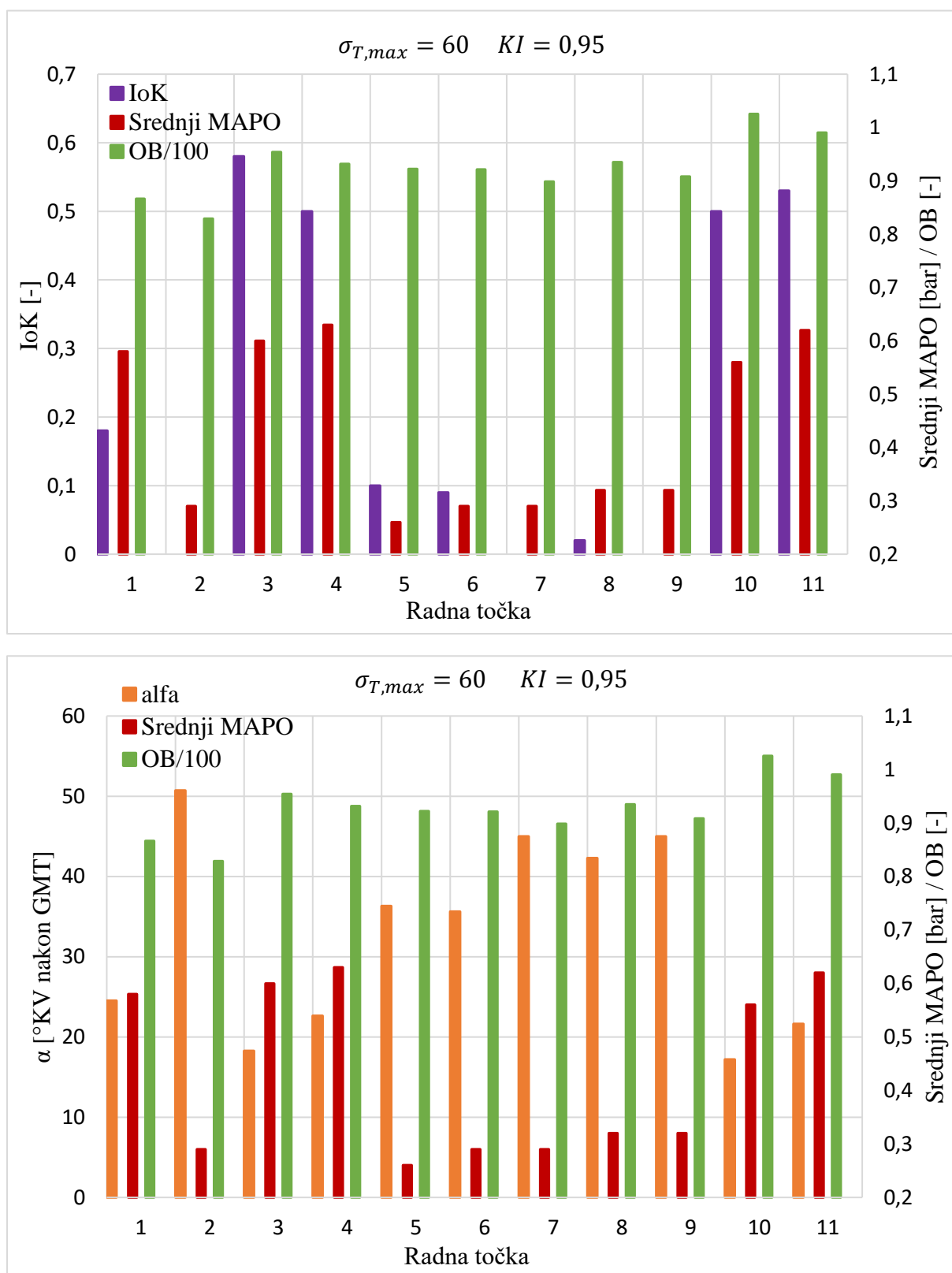
Slika 19. Usporedba MAPO i OB s IoK i α_{det} za $\sigma_{T,max}=45$ i $KI=0,85$

- Kombinacija: $\sigma_{T,max} = 55$, $KI = 0,9$



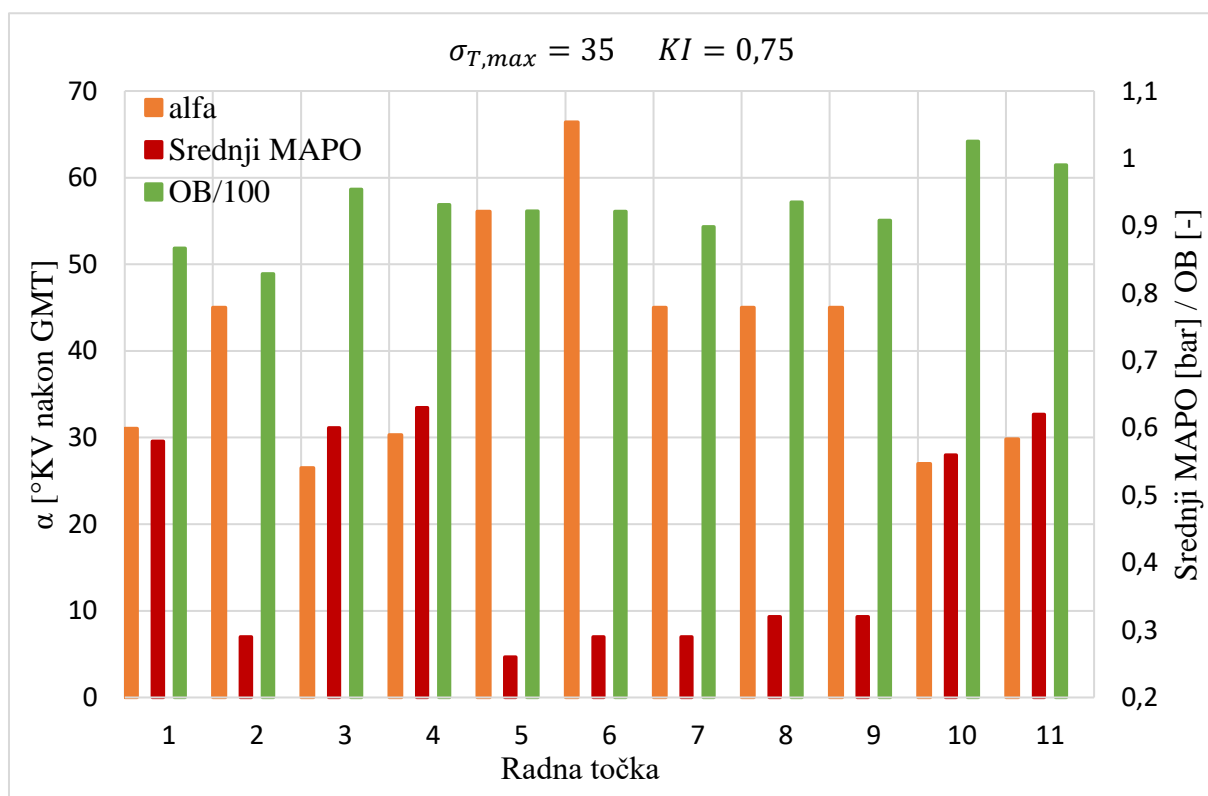
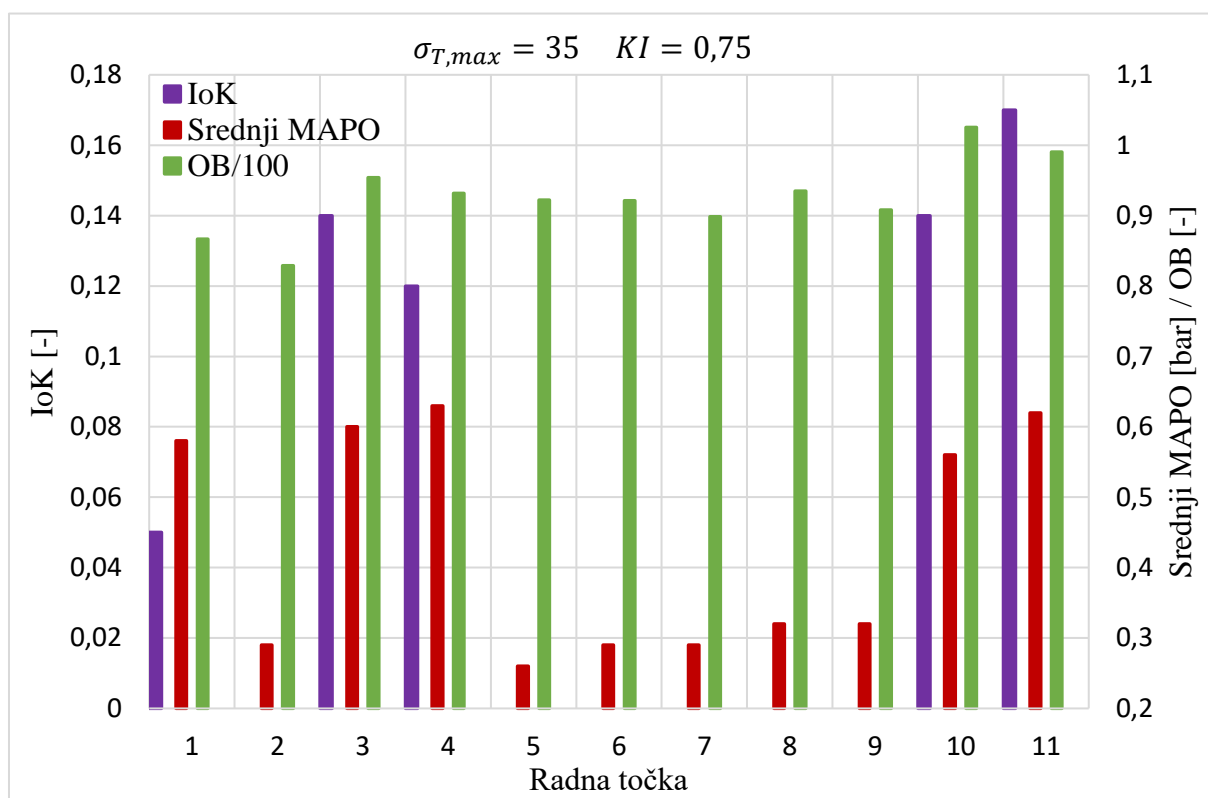
Slika 20. Usporedba MAPOi OB s IoK i α_{det} za $\sigma_{T,max}=55$ i $KI=0,9$

- Kombinacija: $\sigma_{T,max} = 60$, $KI = 0,95$



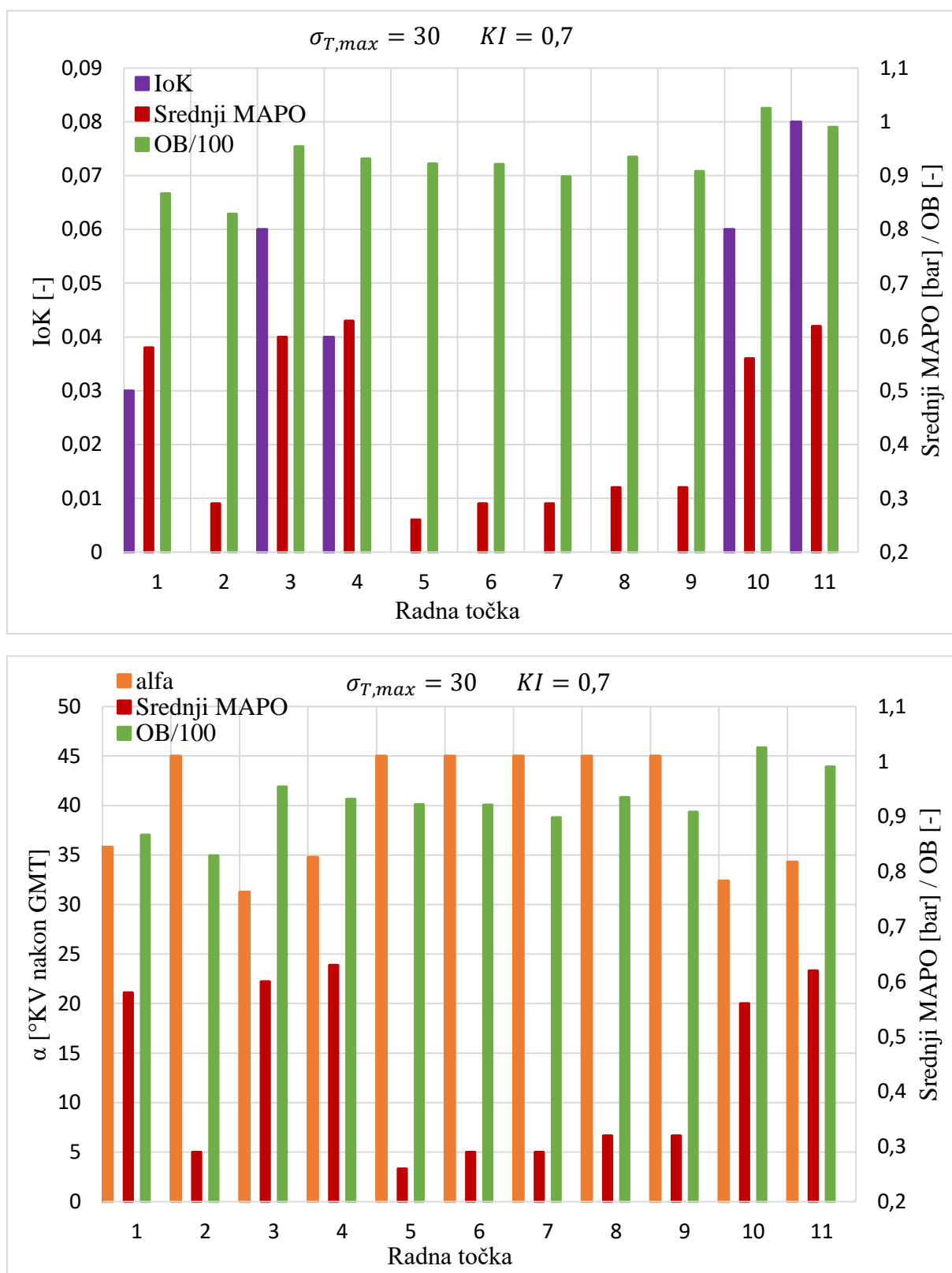
Slika 21. Usporedba MAPO i OB s IoK i α_{det} za $\sigma_{T,max}=60$ i $KI=0,95$

- Kombinacija: $\sigma_{T,max} = 35$, $KI = 0,7$



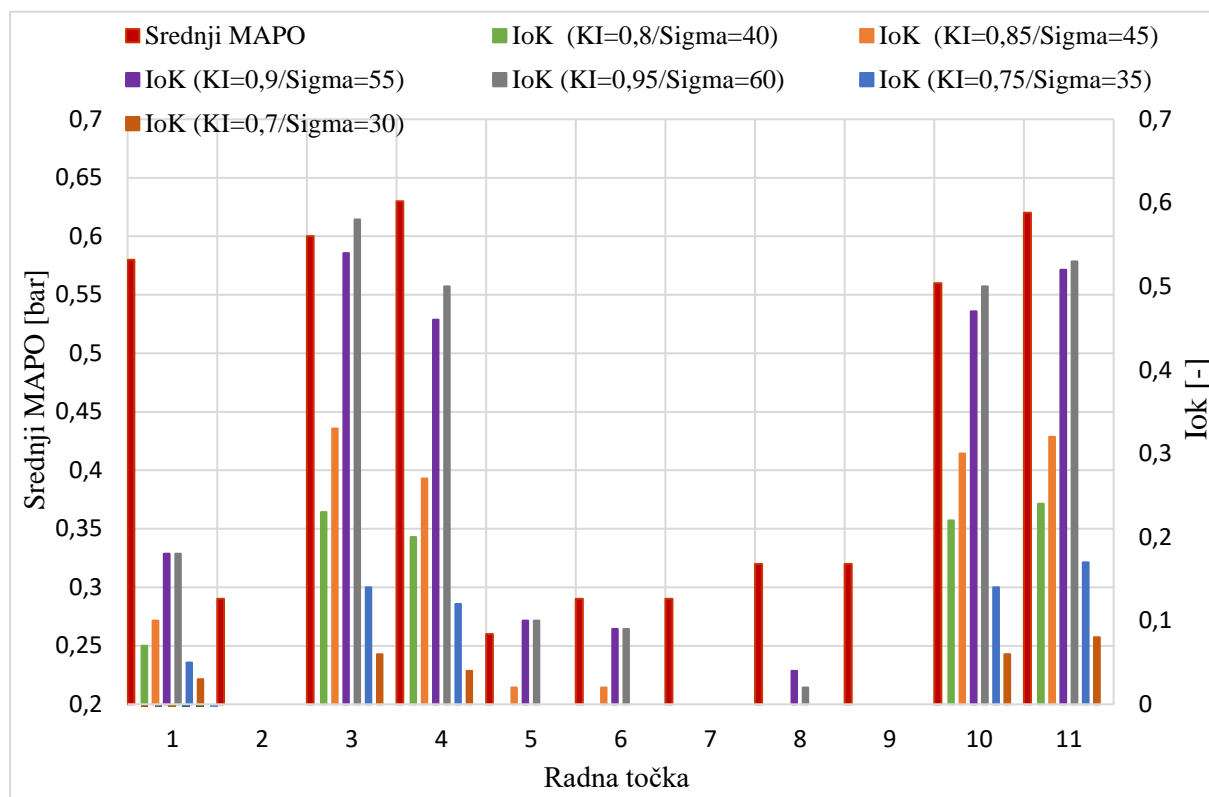
Slika 22. Usporedba MAPO i OB s IoK i α_{det} za $\sigma_{T,max}=35$ i $KI=0,75$

- Kombinacija: $\sigma_{T,max} = 30$, $KI = 0,7$



Slika 23. Usporedba MAPO i OB s IoK i α_{det} za $\sigma_{T,max}=30$ i $KI=0,7$

Radi lakše usporedbe rezultata intenziteta detonacije kojeg model daje za različite kombinacije $\sigma_{T,max}$ i KI na slici 24 prikazana je usporedba vrijednosti srednjeg MAPO sa intenzitetom detonacije za svih šest kombinacija $\sigma_{T,max}$ i KI.



Slika 24. Usporedba MAPO i IoK za sve kombinacije $\sigma_{T,max}$ i KI

Tijekom analize razlika u intenzitetu detonantnog izgaranja između eksperimenta i simulacije uočeno je kao prvo da u usporedbi s vrijednostima indeksa MAPO simulacijom dobiveni intenziteti detonacije IoK pokazuju značajno užu spektar vrijednosti. Za prvu kombinaciju najveće standardne devijacije temperature neizgorjele zone $\sigma_{T,max} = 40$ i granične vrijednosti integrala detonantnog izgaranja $KI = 0,8$ uočavamo da simulacija pokazuje neku vrijednost intenziteta detonantnog izgaranja u svim izrazito detonirajućim radnim točkama, a u radnim točkama 5, 6 i 8 koje su slabo detonirajuće intenzitet detonantnog izgaranja je nula. Radna točka 5 ima tek jedan ciklus u kojem je vrijednost indikatora MAPO $> 0,5$ bar, radna točka 6 ima petnaest ciklusa u kojima je vrijednost indikatora MAPO $> 0,5$ bara i 2 ciklusa s MAPO > 1 bar, dok radna točka 8 ima osam ciklusa u kojima je MAPO $> 0,5$ bar i jedan ciklus s MAPO > 1 bar. Nadalje, iz dijagrama se uočava da simulacija pokazuje znatno veće vrijednosti intenziteta detonantnog izgaranja za radne točke 10 i 11 od intenziteta detonantnog izgaranja za radnu točku 1 iako sve tri radne točke imaju približno jednaku srednju vrijednost indikatora MAPO. Međutim, ako se pogleda u tablicu 4 vidi se da radne točke 10 i 11 imaju veći broj

ciklusa koje prelaze vrijednosti $MAPO > 1,5$ bar i $MAPO > 2$ bar od radne točke 1, što znači da je u tim radnim točkama stvarno intenzitet detonacije veći. Iz dijagrama koji prikazuje kut zakreta koljenastog vratila u trenutku pojave detonantnog izgaranja vidimo da kod jače detonirajućih radnih točaka simulacija pokazuje raniju pojavu detonantnog izgaranja u odnosu na slabije detonirajuće radne točke, pri čemu smatramo da do detonacije nije ni došlo ako simulacija daje rezultat kuta $\alpha_{det} > 45^\circ$ KV. Povećanjem najveće standardne devijacije temperature neizgorjele smjese na vrijednost $\sigma_{T,max} = 45$ i integrala detonantnog izgaranja na $KI = 0,85$ uočavamo da simulacija daje veće vrijednosti intenziteta detonantnog izgaranja u odnosu na prethodni slučaj, te pokazuje neku vrijednost intenziteta detonantnog izgaranja i u radnim točkama 5 i 6 koje u prethodnom slučaju nisu bile simulacijom detektirane kao detonirajuće radne točke. Usporedbom kuta zakreta koljenastog vratila u trenutku pojave detonantnog izgaranja uočavamo da se s povećanjem vrijednosti $\sigma_{T,max}$ i KI kut pojave detonantnog izgaranja pomiče prema ranije. Trend povećanja intenziteta detonantnog izgaranja nastavlja se s daljnjim povećanjem najveće standardne devijacije temperature neizgorjele smjese i granične vrijednosti integrala detonantnog izgaranja. Pa tako uočavamo da za kombinaciju $\sigma_{T,max} = 60$ i $KI = 0,95$ simulacija daje najveće vrijednosti intenziteta detonantnog izgaranja te detektira sve izrazito i slabo detonirajuće radne točke. Smanjenjem vrijednost najveće standardne devijacije na $\sigma_{T,max} = 35$ i integrala detonantnog izgaranja na $KI = 0,75$ vrijednosti intenziteta detonantnog izgaranja se značajno smanjuju, a kut zakreta koljenastog vratila u trenutku pojave detonantnog izgaranja pomiče se prema kasnije, te model detektira samo izrazito detonirajuće radne točke. Za zadnju kombinaciju $\sigma_{T,max}$ i KI , koja ima najmanje vrijednosti najveće standardne devijacije temperature neizgorjele smjese i integrala detonantnog izgaranja, simulacija kao rezultat daje najmanje vrijednosti intenziteta detonantnog izgaranja i najkasniji kut zakreta koljenastog vratila u trenutku pojave detonantnog izgaranja, međutim i dalje su sve izrazito detonirajuće radne točke detektirane.

Iz izloženog možemo zaključiti da između eksperimentalno određenog indeksa $MAPO$ i simulacijom dobivenog intenziteta detonacije IoK ne postoji direktna veza, te stoga o pojavi i intenzitetu detonantnog izgaranja možemo zaključivati samo kvalitativnom usporedbom ta dva indikatora. Uočeno je da za veće vrijednosti $\sigma_{T,max}$ i KI novi model detonantnog izgaranja kao rezultat daje veću vrijednost intenziteta detonantnog izgaranja i detektira sve detonirajuće radne točke. Iz toga slijedi da za veće vrijednost $\sigma_{T,max}$ i KI model dobro opisuje pojavu detonantnog izgaranja, pri čemu zadovoljavajući rezultat dobivamo već za kombinaciju $\sigma_{T,max} = 45$ i $KI = 0,85$ stoga nije nužno daljnje povećanje tih parametara.

U dijagramima 18.-23. za sve radne točke prikazana je i vrijednost minimalnog oktanskog broja pri kojem prema modelu detonantnog izgaranja koji je trenutno implementiran u Boost neće doći do pojave detonacije. Usporedbom eksperimentalno određenog indeksa MAPO s oktanskim brojem uočavamo da je oktanski broj u radnim točkama 5, 6 i 8 koje su prema eksperimentalnim rezultatima slabo detonirajuće radne točke veći od oktanskog broja za radnu točku 1 koja je prema eksperimentalnim rezultatima izrazito detonirajuća radna točka. Nadalje, vrijednost oktanskog broja je i u radnim točkama 9 i 7 koje su prema eksperimentalnim rezultatima nedetonirajuće radne točke veća od oktanskog broja za radnu točku 1. Također, iz prikazanih rezultata vidljivo je da se vrijednost oktanskog broja mijenja u užem spektru vrijednosti od intenziteta detonantnog izgaranja dobivenog novim modelom detonantnog izgaranja. Budući da se rezultati dobiveni novim modelom detonacije dobro poklapaju s eksperimentalnim rezultatima, te da pokazuju širi spektar vrijednosti od oktanskog broja, možemo zaključiti da novi model detonacije bolje predviđa i opisuje pojavu detonantnog izgaranja od trenutno u Boost-u implementiranog modela detonacije.

5. ZAKLJUČAK

Prednost novog modela detonantnog izgaranja u odnosu na postojeće modele je modeliranje temperaturne raspodjele u neizgorjeloj smjesi te primjena dvaju integrala detonantnog izgaranja, jednog za detekciju pojave niskotemperaturnog izgaranja i drugog za detekciju visokotemperaturnog izgaranja, odnosno pojave samozapaljenja. Ako se tijekom proračuna izgaranja u zoni neizgorjele smjese jave uvjeti za pojavu samozapaljenja, rezultat modela je kut zakreta koljenastog vratila u trenutku pojave samozapaljenja i bezdimenzijska vrijednost koja predstavlja procjenu intenziteta detonantnog izgaranja. Model ima dva kalibracijska parametra najveću standardnu devijaciju temperature u neizgorjeloj zoni i graničnu vrijednost integrala detonantnog izgaranja. U svrhu validacije modela na eksperimentalnom motoru izmjereno je 11 radnih točaka, od kojih su dvije bez udjela EGR te su upravo one poslužile kao referentne točke pri kalibraciji novog modela. Pronađeno je ukupno šest različitih kombinacija najveće standardne devijacije temperature u neizgorjeloj zoni i granične vrijednosti integrala detonantnog izgaranja, za koje model daje zadovoljavajući rezultat za referentne točke te je u idućem koraku provedena simulacija svih radnih točaka za sve kombinacije $\sigma_{T,max}$ i KI.

Sposobnost novog modela da predviđa pojavu detonantnog izgaranja validirana je usporedbom rezultata simulacije s prethodno eksperimentalno određenim indikatorom MAPO. Analizom rezultata utvrđeno je da za veće vrijednosti parametra $\sigma_{T,max}$ i KI model kao rezultat daje veće vrijednosti intenziteta detonantnog izgaranja i raniji kut zakreta koljenastog vratila u trenutku pojave detonantnog izgaranja. S kombinacijom parametara $\sigma_{T,max} = 35$ i $KI = 0,75$ te $\sigma_{T,max} = 0,3$ i $KI = 0,7$ model detektira samo izrazito detonirajuće radne točke dok one slabo detonirajuće ne. Stoga možemo zaključiti da pri većim vrijednostima $\sigma_{T,max}$ i KI model bolje predviđa i opisuje pojavu detonantnog izgaranja, pri čemu se zadovoljavajući rezultat dobiva već pri vrijednostima $\sigma_{T,max} = 45$ i $KI = 0,85$ te nije nužno daljnje povećanje tih parametara.

Nadalje, u rezultatima su uspoređeni eksperimentalni rezultati i rezultati novog modela detonantnog izgaranja s rezultatima modela detonantnog izgaranja koji je trenutno implementiran u Boost. Trenutni model kao rezultat daje minimalnu vrijednost oktanskog broja pri kojem neće doći do pojave detonantnog izgaranja. Analizom rezultata pokazalo se da je vrijednost oktanskog broja u nekim radnim točkama koje su prema eksperimentalnim rezultatima nedetonirajuće radne točke veća od vrijednosti za radne točke koje su prema eksperimentu izrazito detonirajuće, te da se oktanski broj mijenja u vrlo uskom spektru vrijednosti. Budući da se rezultati novog modela detonantnog izgaranja dobro poklapaju s

eksperimentalnim rezultatima možemo zaključiti da novi model detonantnog izgaranja bolje predviđa i opisuje pojavu detonacije od trenutno u Boost-u implementiranog modela detonantnog izgaranja.

LITERATURA

- [1] Mahalec, Lulić, Kozarac: *Motori s unutarnjim izgaranjem*, Fsb, Zagreb, 2012
- [2] Božić, Vučetić, Kozarac, Lulić: *Experimental investigation on influence of EGR on Combustion performance in SI Engine*, Proceedings of The 8th European Combustion Meeting (April): 18-21, 2017, Dubrovnik, Croatia, 1821-1826, Dubrovnik, Croatia.
- [3] Rothe, M., Heidenrich, T., Spicher, U.: *Knock Behavior of SI-Engines: Thermodynamic Analysis of Knock Onset Location and Knock Intensities*, SAE Technical Paper 2006-01-0225, 2006.
- [4] Tomić: *Model detonantnog izgaranja u Ottovom motoru*, Fsb, Zagreb, 2015
- [5] <http://www.continentalengines.com/hatz-diesel-1d90-1d81-engines.html>
- [6] Zhen, X., Wang, Y., Xu, S., Zhu, Y., Tao, C., Xu, T., Song, M.: *The engine knock analysis – An overview*, Applied Energy 92, 628 – 636, 2012.
- [7] Hajireza, S., Mauss, F., Sundén, B.: *Two-Zone Model of Gas Thermodynamic State in SI Engines with Relevance for Knock*, The Forth International Symposium 98, 1998.
- [8] Rothe, M., Heidenrich, T., Spicher, U.: *Knock Behavior of SI-Engines: Thermodynamic Analysis of Knock Onset Location and Knock Intensities*, SAE Technical Paper 2006-01-0225, 2006.
- [9] AVL BOOST – version 2010, Users Guide and Theory, Edition 11/2010
- [10] Kozarac, Tomić, Taritas, Chen, Dibble: *Model for Prediction of Knock in the Cycle Simulation by Detail Characterization of Fuel and Temperature Stratification*, SAE Technical Paper 2015-01-1245, 2015
- [11] Worret, R., Bernhardt, S., Schwarz, F., Spicher, U.: *Application of Different Cylinder Pressure Based Knock Detection Methods in Spark Ignition Engines*, SAE Technical Paper 2002-01-1668, 2002.

- [12] D'Errico, G., Lucchini, T., Onorati, A., Mehl, M., Faravelli, T., Ranzi, E., Merola, S., Veglieco, B. M.: *Development and Experimental Validation of a Combustion Model with Detailed Chemistry for Knock Predictions*, SAE Technical Paper 2007-01-0938, 2007.